Numero 314
Ottobre 1994
Anno XXVII
Volume LIII

Le migrazioni nell'Europa contemporanea

In assenza di norme nazionali e comunitarie, il trasferimento sempre più massiccio di persone verso i paesi dell'Europa occidentale può creare situazioni locali di conflittualità e costituire motivo di attrito fra Stati

di Armando Montanari e Russell King

Le migrazioni sono un fenomeno planetario che riguarda la complessità dei paesi e dei popoli del mondo; tuttavia, sebbene esista già dal 1980 una raccomandazione delle Nazioni Unite che definisce i criteri per identificare da un punto di vista sia statistico che normativo la «condizione di immigrato», questa in realtà non trova univoca interpretazione in tutti i paesi, anche per la necessità di adeguarla alla evoluzione del fenomeno e alle caratteristiche che questo assume nei vari contesti economici e geografici.

In Italia, per esempio, la definizione di immigrato è applicata a individui che, non in possesso della cittadinanza italiana, o, come è stato stabilito di recente, di uno degli altri paesi dell'Unione europea, non possano essere classificati come turisti, uomini d'affari, persone in transito, personale con passaporto diplomatico o membri delle forze armate dei paesi alleati.

Profondamente cambiati i rapporti tra Est e Ovest verso la fine degli anni ottanta e mutati, quindi, i problemi della sicurezza e della libertà di circolazione delle persone, attualmente si ritiene che possano essere proprio le migrazioni a costituire uno dei principali problemi di attrito nelle relazioni tra gli Stati, e di conseguenza anche una potenziale minaccia alla sicurezza e alla pace in Europa. Il riconoscimento di questa situazione a rischio è stato autorevolmente avallato dalla Conferenza dei Ministri degli interni e della giustizia di 28 paesi europei che si sono incontrati a Berlino il 30 e 31 ottobre 1991 per discutere, per la prima volta, delle modalità di controllo sulle migrazioni internazionali. Nello stesso anno, al vertice europeo di Lussemburgo, il cancelliere tedesco Helmuth Kohl sottolineava come nella Comunità gli immigrati sfiorino oramai i 10 milioni, una popolazione grosso modo pari a quella del Belgio, venendo così a costituire il «tredicesimo paese membro della CEE», e in tal modo invitando i partner a dar vita al più presto a una politica dell'immigrazione e dei visti meno eterogenea e più coerente con un modello di Europa senza frontiere interne. La stessa posizione è stata ribadita dal rappresentante del Governo tedesco alla riunione dei Ministri degli interni e della giustizia della CEE tenutasi a Copenaghen nel giugno 1993 per discutere delle politiche migratorie all'indomani del rogo di Solingen in cui cinque donne turche sono morte nell'incendio doloso della propria abitazione.

Le migrazioni non hanno mai costituito di per se stesse una minaccia alla sicurezza e alla pace; anzi sono esse il risultato di squilibri economici, di differenze nella struttura demografica, di guerre e conflitti politici. Numerosi studi svolti negli Stati Uniti, in Germania e Francia hanno dimostrato che la manodopera straniera si concentra soprattutto nei settori produttivi in cui esisteva una più alta propensione all'importazione. Verrebbe così confermata l'esistenza di una possibile relazione tra le politiche protezionistiche e lo stimolo all'emigrazione, in quanto si riduce l'assorbimento di manodopera nei paesi meno sviluppati e si favorisce una domanda di lavoro scarsamente qualificato nei paesi industrializzati.

La presenza di cittadini stranieri costituisce certamente uno dei problemi più impellenti che le politiche economiche e sociali di molti paesi europei si trovano a dover affrontare e numerosi sono i settori nei quali, direttamente o indirettamente, si deve fare riferimento ai fenomeni migratori internazionali. E non potrebbe essere altrimenti considerato che, secondo i dati ufficiali, gli stranieri costituiscono il 9 per cento della popolazione belga, l'8 per cento di quella tedesca, oltre il 6 per cento di quella francese, più del 3 per cento di quella inglese e l'1,4 per cento di quella italiana. Inoltre l'OCSE prevede per i prossimi 30 anni l'arrivo di altri 30 milioni di immigrati.

Il differente atteggiamento dei paesi europei nei confronti dei flussi migratori ha contribuito a rallentare notevolmente la realizzazione dell'«Europa senza frontiere». All'inizio del 1993 l'entrata in vigore del Mercato unico ha dato luogo soltanto a una «Europa delle frontiere», ma senza dogane. Si è infatti assistito a questo paradosso: le merci di qualsiasi tipo possono liberamente circolare, mentre le persone devono continuare a mostrare le carte di identità. Le critiche sono principalmente dirette verso la Grecia e l'Italia che, sebbene abbiano introdotto normative più restrittive, non riescono a farle rispettare, forse anche per la difficoltà di controllare i quasi 40 000 chilometri di sviluppo costiero. Il Mediterraneo è divenuto quindi una sorta di Rio Grande, il fiume che, in America, segna il confine terrestre (5335 chilometri) tra il «Nord» e il «Sud», cioè tra Stati Uniti e Messico, e attraverso il quale numerosi sono i casi di migrazione clandestina.

Nonostante la sua rilevanza, il fenomeno non è molto considerato a livello di statistiche ufficiali e risulta pressoché sconosciuto alla maggior parte degli europei se non per una serie di luoghi comuni che servono esclusivamente come riferimento culturale per i movimenti di estrema destra che si ispirano al razzismo.

In provincia di Modena (Regione Emilia-Romagna), i sindacati hanno commissionato una ricerca sugli oltre 700 articoli apparsi sulla stampa locale tra l'agosto 1990 e il gennaio 1993 e aventi per oggetto gli immigrati. La grande maggioranza degli articoli, circa l'85 per cento, si interessava agli immigrati soltanto in riferimento a episodi di cronaca nera. Solo quattro erano gli articoli di approfondimento. In Italia nel 1992 sono stati denunciati 37 111 stranieri, 14 806 sono stati arrestati e 7333 risultavano detenuti al 31 dicembre 1992. Sebbene gli arresti per spaccio di droga, risse, furti e prostituzione siano proporzionalmente assai elevati tra gli stranieri, vi è anche da considerare che numerosi sono i crimini commessi dalla malavita organizzata internazionale e da movimenti politico-religiosi estremisti che non hanno nulla a che fare con le comunità di immigrati. È pur vero che spesso la malavita recluta più agevolmente la sua manovalanza tra quanti risiedono e lavorano illegalmente in un paese o si trovano in condizioni disagiate.

I problemi e le politiche relative alle migrazioni non si possono certo generalizzare in quanto vi è una sostanziale differenza tra un bracciante del Ghana impegnato nella raccolta di prodotti agricoli, un tecnico polacco che lavora come carpentiere in un cantiere edile, un ingegnere argentino che dirige l'ufficio di una multinazionale, un rifugiato politico asiatico ospitato in un campo profughi, oppure ancora un pensionato tedesco che si è trasferito in una località della costa spagnola del Mediterraneo, o soltanto vi trascorre i mesi invernali. A queste semplici banalizzazioni possono essere ricondotte le tipologie dei più recenti flussi migratori internazionali.

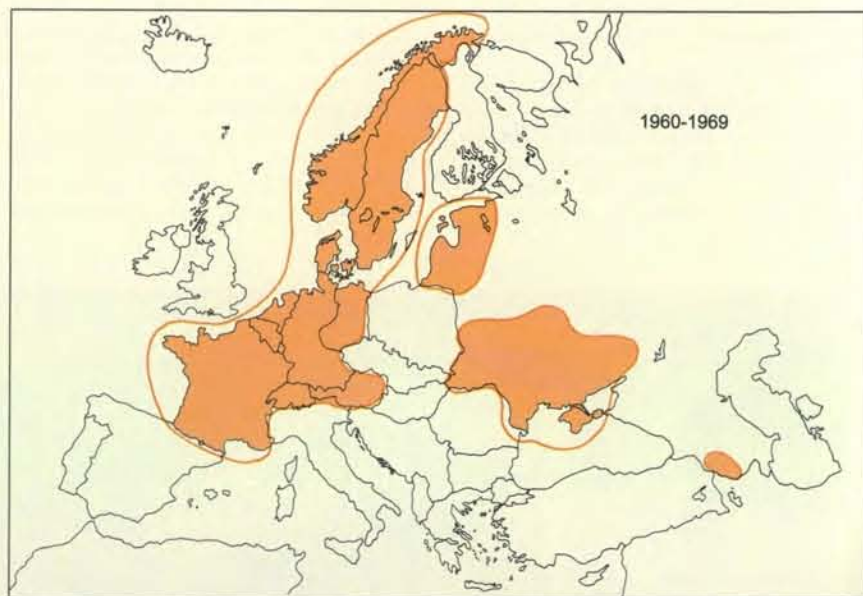
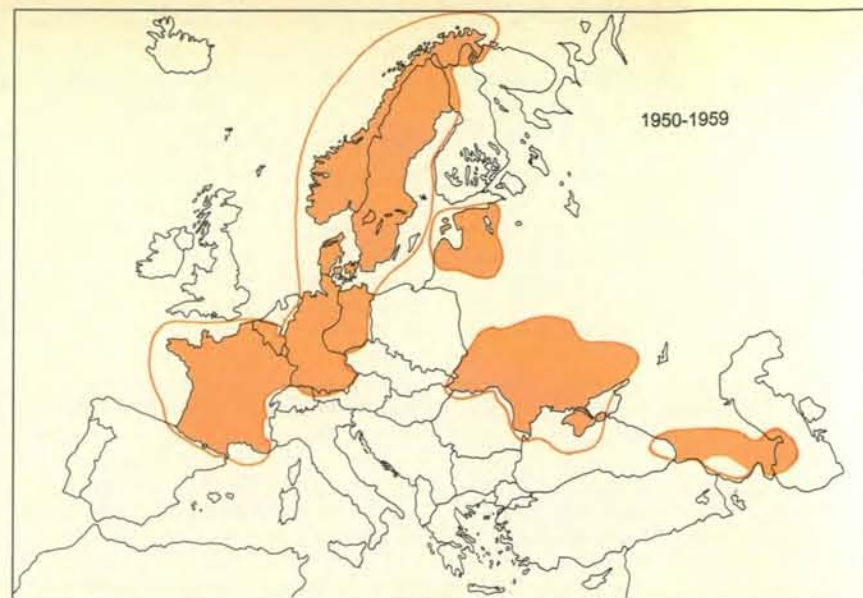
In questo articolo presentiamo alcuni dei risultati di una ricerca condotta dal gruppo di lavoro Population Processes in the Urban and Regional System (RURE/POP) diretto da uno di noi (Montanari) nell'ambito del programma Regional and Urban Restructuring in Europe (RURE) promosso dalla European Science Foundation (ESF) di Strasburgo. Il programma RURE, al quale hanno aderito esperti in vari campi delle scienze sociali, soprattutto in geografia economica, di circa 70 istituti universitari e di ricerca di una ventina di paesi europei, si è svolto nel periodo 1990-1993 e si è concluso con una Conferenza tenuta a Roma nel marzo 1994 presso la Società geografica italiana e il Consiglio nazionale delle ricerche. (I risultati della ricerca attinente le migrazioni internazionali sono stati pubblicati nel volume *Mass Migration in Europe: the Legacy and the Future* a cura di Russell King, Belhaven Press, Londra, 1993, mentre ulteriori elaborazioni dei dati raccolti sono in corso di pubblicazione in una serie di volumi e in articoli in riviste specializzate.)

Questa «passeggiata» a Benidorm, sulla Costa Blanca, in Spagna, in un assolato pomeriggio di febbraio, è indicativa di un fenomeno migratorio particolare riguardante gli anziani. In questa località sarebbero oltre 220 000 le presenze medie giornaliere di persone provenienti da altri paesi europei per soggiorni temporanei o definitivi. (Foto Armando Montanari.)

L'Europa è divenuta area di immigrazione netta a partire dalla fine della seconda guerra mondiale. Nell'ambito dell'Unione europea, peculiare è però la situazione di paesi come Portogallo, Spagna, Italia e Grecia, che sono stati esportatori di manodopera per molti decenni e sono divenuti a loro volta terra di immigrazione soltanto a partire dagli anni settanta. In quel periodo i cittadini di questi quattro paesi mediterranei residenti in Germania e Francia erano circa 2 700 000 mentre alla fine del decennio successivo erano scesi a circa 2 300 000 a causa di un consistente movimento migratorio di ritorno. Quasi contemporaneamente all'esaurirsi dei fenomeni di espatrio questi quattro paesi sono stati investiti da un flusso sempre crescente di emigrati provenienti da paesi economicamente meno sviluppati dell'Africa, dell'Asia e dell'America Latina.

Le trasformazioni politiche e sociali che hanno interessato l'Europa negli ultimi anni hanno dato luogo a nuovi flussi migratori dai paesi che in precedenza erano a economia pianificata. Sebbene queste immigrazioni provengano da aree non identificabili con quelle del Terzo Mondo, ne hanno le stesse caratteristiche e comunque rappresentano per i paesi occidentali gli stessi problemi e le stesse difficoltà di gestione.

Il fenomeno, repentino quanto inaspettato, ha trovato assolutamente impreparate le amministrazioni e la cultura politica di Portogallo, Spagna, Italia e Grecia che almeno inizialmente hanno reagito in modo contraddittorio sulla base delle esperienze e della sensibilità tipiche dei paesi di emigrazione, rinunciando a controllare il fenomeno in modo efficace e lasciando di conseguenza che gruppi sempre più numerosi si insediassero nel proprio territorio in modo illegale, nel senso che la maggior parte degli immigrati non disponeva di un contratto di lavoro e neppure di un permesso di soggiorno. Chi ne era provvisto, inoltre, lo aveva conseguito per motivi di studio o per turismo.

Le difficoltà iniziali hanno per molto tempo impedito che venisse espressa una reale politica per l'immigrazione: invece di indicare con precisione regole, diritti e doveri per quanti erano immigrati si è avuta una oscillazione periodica tra posizioni di permissivismo, dovute a intempestive promesse, e rigide limitazioni sulla base di velleitarie normative. Per queste ragioni è oggi difficile quantificare la reale consistenza del flusso migratorio in Portogallo, Spagna, Italia e Grecia, poiché le fonti ufficiali riportano unicamente i dati relativi alla parte avvenuta legalmente, mentre assai più consistente è la sua parte «sommersa». La presenza straniera nei paesi meridionali dell'Unione europea ha acquistato un peso rilevante mai prima d'ora registrato anche se è ancora lontano dai valori raggiunti nei paesi europei storicamente sede di immigrazione,

Nell'Europa occidentale, negli ultimi 40 anni è andato progressivamente aumentando il numero di paesi caratterizzati da immigrazione netta proveniente in prevalenza da paesi in via di sviluppo e anche da paesi dell'Europa orientale, mentre in alcune delle repubbliche dell'ex Unione Sovietica si sono registrati flussi migratori dalle regioni asiatiche della stessa ex Unione. In alcuni casi la migrazione ha contribuito alla crescita demografica del paese ospite; in altri ha ritardato gli effetti del declino numerico della popolazione locale. Negli anni cinquanta il fenomeno era limitato, per quanto riguarda l'Europa occidentale, a Francia, Belgio, Germania Federale e paesi scandinavi (con esclusione della Finlandia); a Estonia, Lettonia, Ucraina, Moldavia, Georgia e Azerbaigian nell'Europa orientale. Negli anni sessanta, oltre ai paesi già indicati, la migrazione ha riguardato Paesi Bassi, Svizzera e Austria, in Occidente; Lituania e Armenia, nell'Europa orientale, mentre ne venivano escluse Georgia e Azerbaigian. Negli anni settanta si aggiungevano, nell'Europa occidentale, Italia, Irlanda e Regno Unito, oltre alle regioni occidentali della Russia. Negli anni ottanta sono stati coinvolti dal fenomeno anche Portogallo, Spagna, Grecia e Bielorussia, mentre ne sono rimaste escluse Irlanda e Armenia.

quali Francia, Germania e Regno Unito.

Nei paesi dell'Europa occidentale risiedono, regolarmente registrati, circa 15 milioni di immigrati, di cui circa 10 milioni provengono dai paesi in via di sviluppo. Oltre a questi bisogna considerare almeno 7-8 milioni di immigrati clandestini: di questi, 2-3 milioni risiedono, più o meno stabilmente, in Portogallo, Spagna, Italia e Grecia.

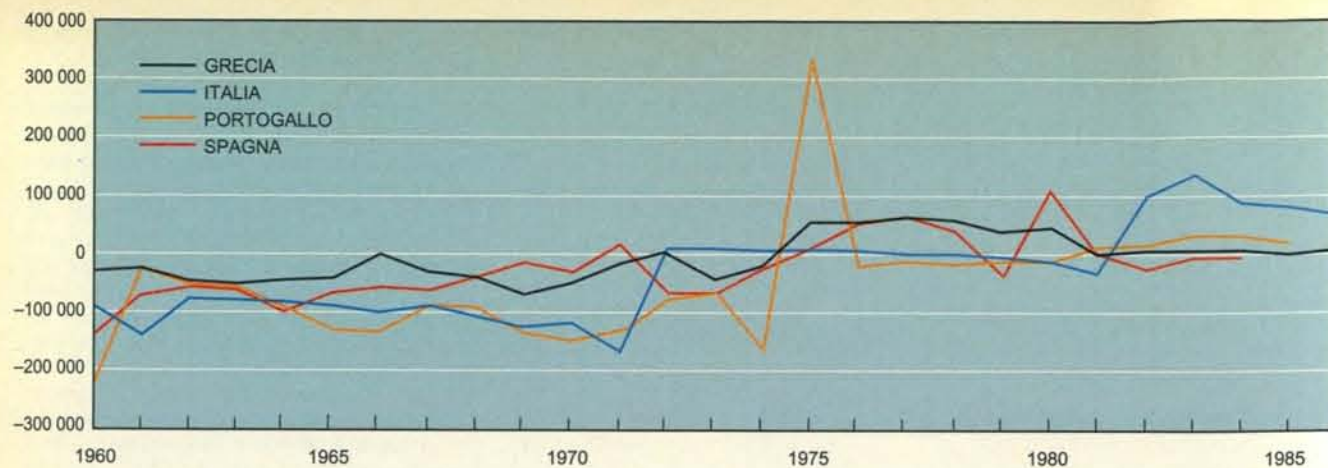
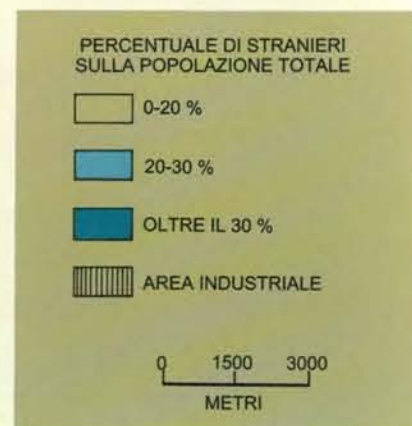
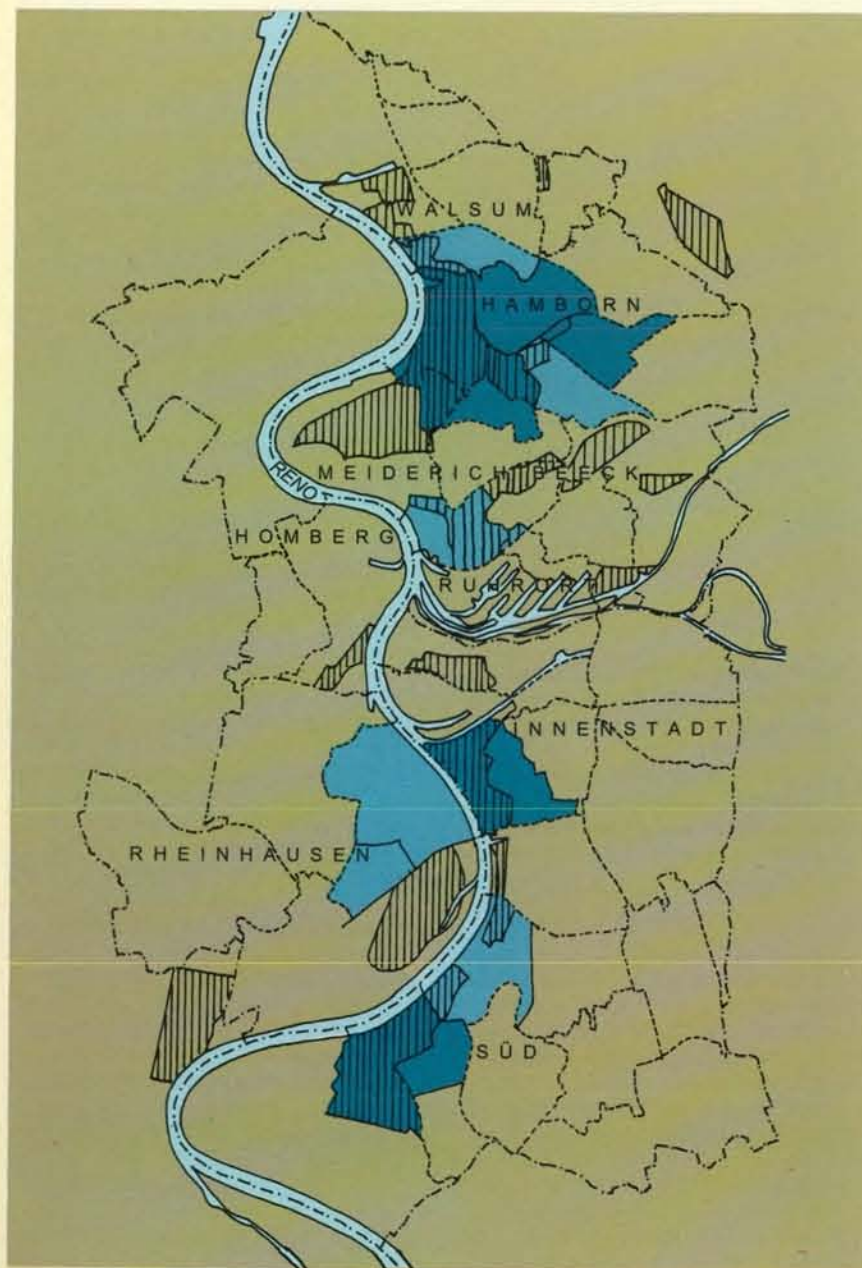
Per l'Istituto nazionale di statistica (ISTAT) gli immigrati presenti ufficialmente sul territorio italiano erano nel 1991 poco più di 625 000. Il Dipartimento affari sociali della Presidenza del Consiglio valuta in 830 000 unità le presenze dei soli extracomunitari, mentre il CENSIS calcola in circa 1 200 000 gli immigrati presenti in Italia, di cui circa il 50 per cento clandestini. Nel 1991 l'ISTAT ha eseguito una stima degli immigrati presenti in Italia nel 1989 integrando le fonti ufficiali con una serie di informazioni statistiche trasversali tra cui quelle del Ministero degli interni (permessi di soggiorno, domande di regolarizzazione, elenchi profughi e rifugiati), del Ministero del lavoro e previdenza sociale (iscritti nelle liste di collocamento e avviati al lavoro), dell'Istituto nazionale per la previdenza sociale (archivi delle posizioni assicurative), dell'Ufficio centrale studenti esteri in Italia (numero e variazioni degli studenti stranieri) e della Caritas (assistiti presso i servizi socio-caritativi collegati alla Chiesa).

I dati prodotti a livello nazionale sono stati poi confrontati con quelli elaborati a livello regionale dalle strutture decentrate, anche mediante la verifica e la discussione con un selezionato numero di osservatori «privilegiati». Sulla base di questa stima, attualmente in fase di aggiornamento, risultavano presenti in Italia circa 1 144 000 immigrati di cui 963 000 extracomunitari. La distribuzione regionale dei risultati della stima evidenzia che in Umbria gli immigrati sono pari al 7,2 per cento della popolazione e che le regioni con il più alto numero di extracomunitari sono il Lazio, la Sicilia e la Lombardia, ciascuna con comunità di oltre 100 000 unità.

La cifre relative alla presenza di lavoratori extracomunitari potrebbero sembrare paradossali se si considera che nei paesi dell'Unione europea vi sono oltre 17 milioni di disoccupati. In realtà la disoccupazione interessa soprattutto gli addetti al settore secondario e terziario nelle grandi aree urbane, mentre gli immigrati, anche a causa del fatto che vengono per lo più sottopagati, trovano lavoro in attività stagionali, specie nel settore agricolo ed edilizio, in aree periferiche, e vengono assunti per mansioni particolarmente faticose, o comunque ritenute scomode o sconvenienti, che i disoccupati autoctoni non sono disposti a svolgere.

Inoltre, fin dall'inizio degli anni ottanta è apparsa chiara la netta divisione tra l'incremento demografico dei paesi europei ricchi e quello dei paesi in via di sviluppo. Facendo riferimento, per esempio, all'area euro-mediterranea si nota una netta differenza tra i 12 paesi ricchi dell'Unione europea, che potremmo definire il «Nord», e i 13 paesi mediterranei più o meno in via di sviluppo che potremmo definire il «Sud». Nel 1950 questi 25 paesi avevano un totale di 348 milioni di abitanti, di cui il 75 per cento risiedeva nel Nord. Nel 1990 la popolazione era di 546 milioni, di cui il 59 per cento nel Nord. Le Nazioni Unite prevedono che raggiungerà i 670 milioni nel 2015, di cui il 49 per cento nel Nord e, nel 2025, i 707 milioni, di cui il 46 per cento nel Nord. Di questi 25 paesi la Germania è attualmente lo Stato con il maggior numero di abitanti, seguita da Italia, Regno Unito, Francia, e poi ancora da Turchia ed Egitto. Tra circa tre decenni sarà invece l'Egitto a essere il paese più popoloso, seguito da Germania, Turchia, Francia, Regno Unito, Italia, e poi ancora da Algeria e Marocco.

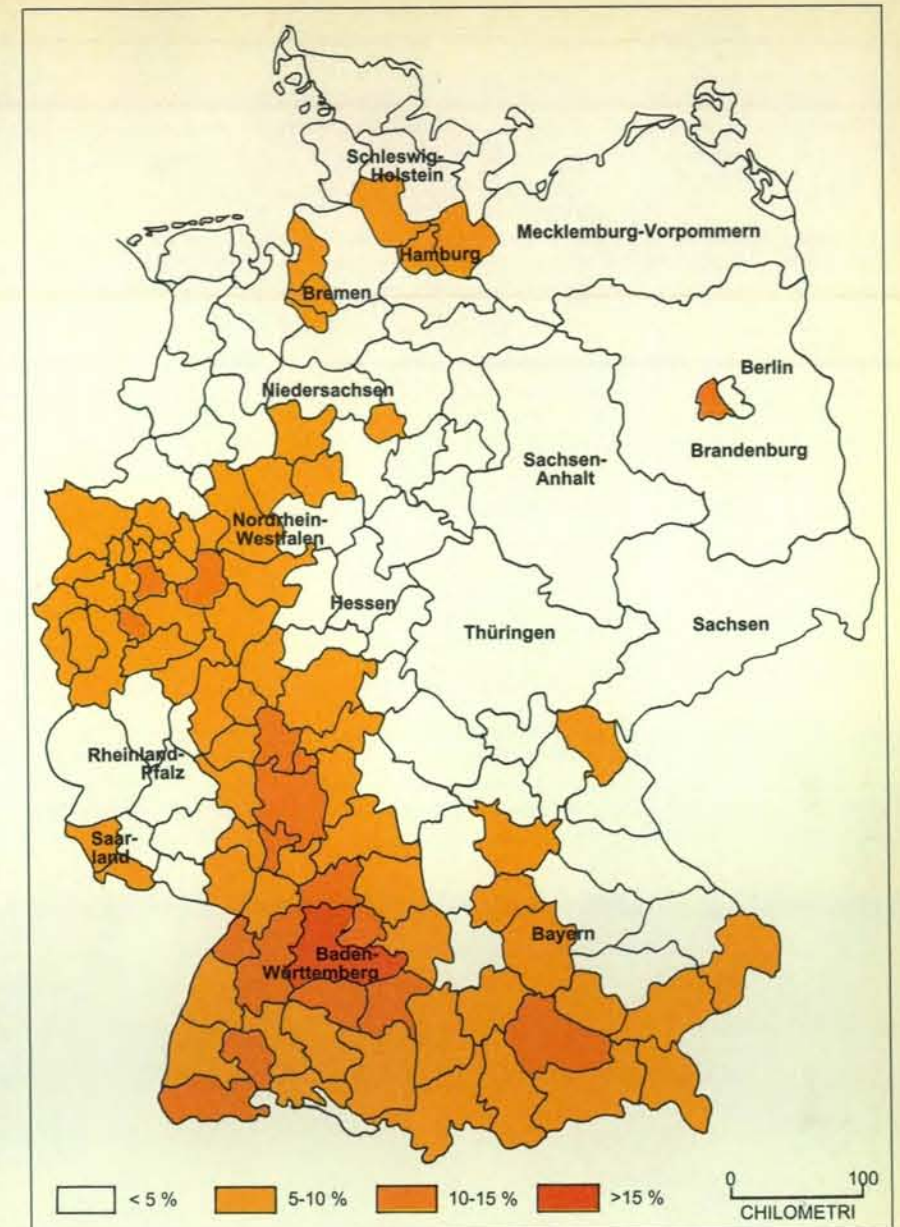
Negli anni immediatamente successivi alla seconda guerra mondiale (i dati si riferiscono al 1950), i giovani di età compresa tra 0 e 15 anni costituivano circa il 31 per cento della popolazione dei paesi che si affacciano sul Mediterraneo, un valore inferiore di tre punti rispetto a quella che era la media a livello mondiale. Nel 1985 i giovani erano rimasti il 31 per cento della popolazione, riducendo il divario rispetto alla situazione mondiale, ma con una distribuzione totalmente diversa. Nel 1950 la maggioranza (56 per cento) viveva nei paesi europei; nel 1985 la maggioranza (65 per cento) viveva invece nei paesi dell'Africa e dell'Asia. Si prevede che questa tendenza continuerà costantemente nei prossimi decenni e che nel 2020 in quei paesi risiederà oltre il 75 per cento dei giovani.

A una proporzione maggiore di giovani nei paesi dell'Africa e dell'Asia fa riscontro l'invecchiamento della popolazione europea. Nell'anno 1950 erano

I bilanci migratori relativi ai quattro paesi qui considerati hanno subìto fra il 1960 e il 1986 varie fluttuazioni: negli ultimi anni Grecia, Italia, Portogallo e Spagna si sono tendenzialmente trasformati da paesi di emigrazione in paesi di immigrazione.

Nella città di Duisburg, in Germania, la popolazione straniera, nel 1991, risulta concentrata soprattutto in prossimità delle aree industriali. Il quartiere di Bruckhausen, situato nelle vicinanze delle acciaierie Thyssen, ha la più alta concentrazione di stranieri (quasi il 53 per cento), seguito da quello di Hüttenheim, vicino alle acciaierie Mannesmann, con quasi il 34 per cento. Secondo alcuni studiosi, la concentrazione di stranieri a livello urbano potrebbe essere messa in relazione a fenomeni di segregazione etnica; mentre, secondo altri, sarebbe il risultato di politiche sociali che discriminano gli stranieri nella assegnazione di alloggi a basso costo.

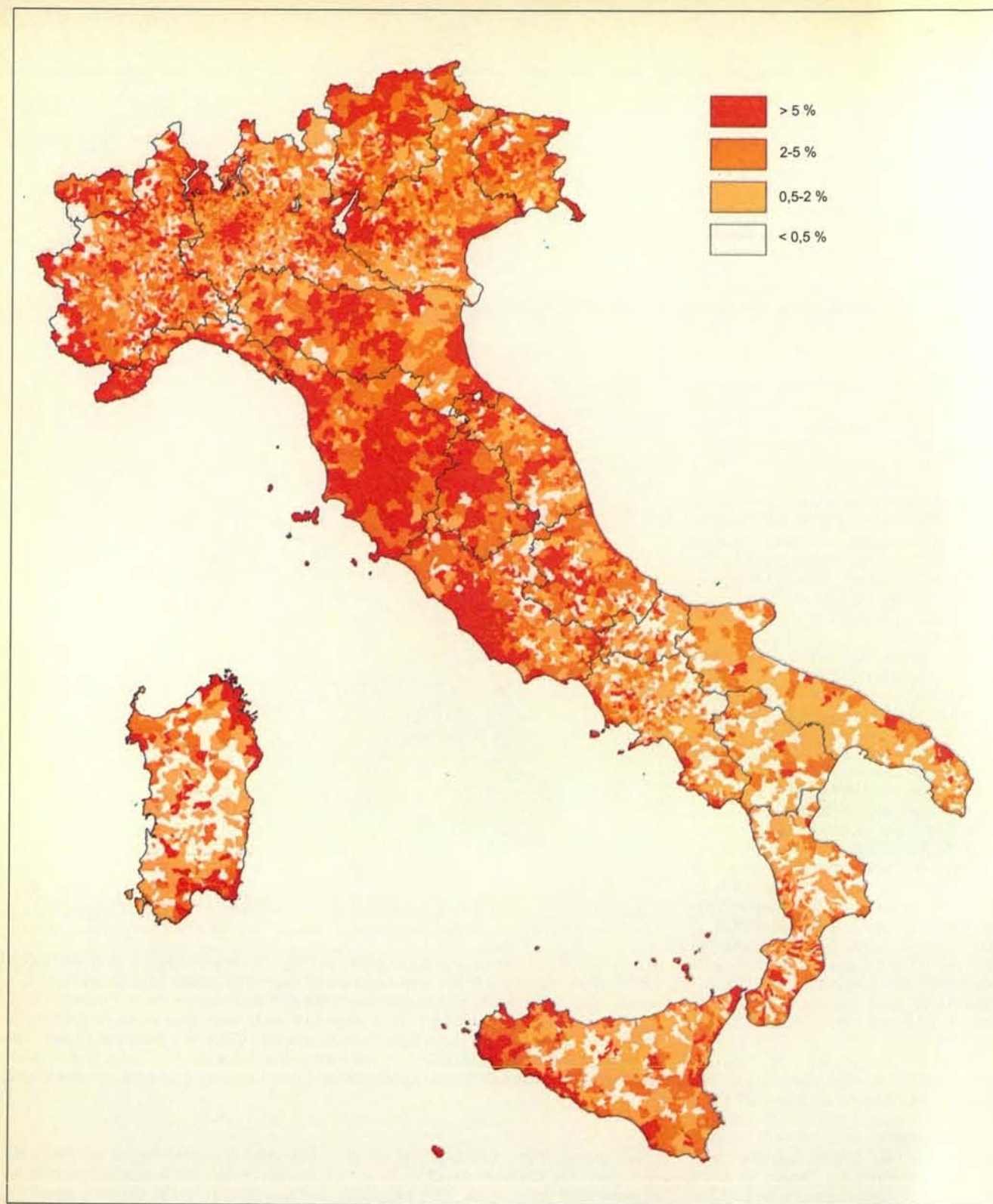
circa 16 milioni gli anziani, ossia coloro con oltre 65 anni di età, e di questi l'80 per cento risiedeva nei paesi europei. Vi è però da considerare che la durata media della vita era, allora, di poco superiore ai 40 anni in tutti i paesi mediterranei dell'Africa e in alcuni dell'Asia (Iraq, Siria, e Turchia). Nel 1985 la popolazione anziana ammontava a poco più di 31 milioni di persone, di cui il 76 per cento nei paesi europei. Secondo le previsioni nell'anno 2020 raggiungerà i 61 milioni, di cui il 63 per cento in Europa. Percentualmente però nei paesi dell'Europa mediterranea la popolazione anziana è passata dal 9 per cento della popolazione totale del 1950, al 12 per cento nel 1985 e raggiungerà il 18 per cento nel 2020.

Le nette differenziazioni qualitative e quantitative della crescita demografica nei paesi del Mediterraneo non potranno non influenzare le relazioni politiche, sociali ed economiche tra il Nord e il Sud, e contribuire all'insorgere di un ancor più consistente flusso migratorio, che potrebbe anche superare le possibilità di assorbimento dei paesi europei con il rischio di provocare gravi squilibri nei servizi sociali, forme di competitività esasperate tra gli immigrati e i ceti indigeni più poveri e anche conflittualità razziali.

Un cenno a parte meritano i flussi migratori dai paesi dell'Est verso l'Europa occidentale che si sono riscontrati dopo la caduta del Muro di Berlino nel novembre 1989 e a causa delle profonde trasformazioni politiche ed economiche che ne sono seguite. Il Muro di Berlino fu realizzato nel 1961 proprio per porre un freno all'intenso flusso migratorio dalla Repubblica Democratica Tedesca verso la Repubblica Federale Tedesca, un flusso che aveva raggiunto dalla fine della guerra la ragguardevole cifra di 3 700 000 unità, ed era costituito in buona parte da intellettuali, ricercatori e professionisti. Circa 200 000 furono coloro che nel 1956 emigrarono nei paesi occidentali dall'Ungheria a seguito dell'intervento delle forze armate sovietiche, e altrettanti dalla Cecoslovacchia nel 1968.

Si valuta che nei 28 anni trascorsi dalla costruzione alla demolizione del Muro siano emigrate dai paesi del Patto di Varsavia circa 2 800 000 persone, su una popolazione totale di 400 milioni. In media 100 000 persone all'anno hanno rischiato la vita per fuggire dai paesi del cosiddetto socialismo reale. La liberalizzazione dei flussi migratori dai paesi dell'Europa orientale ha coinciso con l'affermarsi della politica della *perestrojka* avviata nel 1985 da Mikhail Gorbaciov allo scopo di rafforzare i legami tra l'Unione Sovietica e i paesi a economia di mercato così da ottenere maggiori aiuti economici. Tra il 1948 e il 1986 erano emigrate dall'Unione Sovietica 280 000 persone; nei tre anni successivi si raggiunsero le 850 000.

Gli stranieri che lavorano in Germania (qui espressi in percentuale del numero totale degli occupati nel 1991) sono concentrati soprattutto nelle aree industriali. Si è spesso discusso a livello di amministrazioni locali della opportunità di porre un limite a questa tendenza di polarizzazione per assicurare una migliore gestione e programmazione dei servizi sociali. Una norma del 1975 aveva fissato al 12 per cento la presenza massima di stranieri consentita. Dopo due anni la norma è stata abolita per la difficoltà della sua applicazione e per l'opposizione degli imprenditori.

Una legge sulle procedure di espatrio e di rientro dei cittadini sovietici fu approvata però soltanto nel 1991 ed entrò in vigore due anni più tardi.

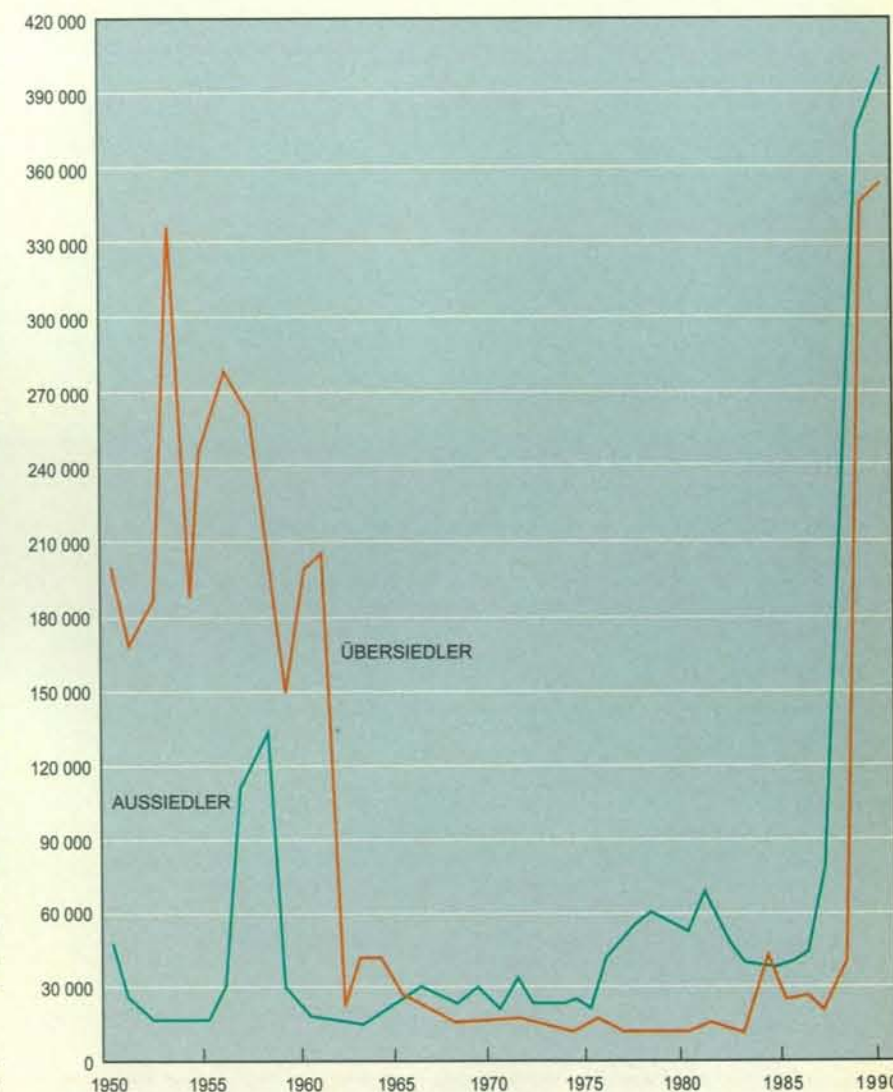
Il flusso migratorio dai paesi dell'Europa orientale, costituito in larga parte da tecnici, intellettuali, ricercatori e professionisti, rientra nel fenomeno noto a livello internazionale con il termine *brain drain*. Liberamente tradotta in italiano con «fuga di cervelli», l'espressione sta appunto a indicare la migrazione internazionale che interessa individui che possiedono un titolo di studio elevato, e alta o altissima specializzazione. Si suole dividere ulteriormente questa categoria a seconda che sia motivata da ragioni sociopolitiche (per esempio conflitti etnici o religiosi, persecuzioni, discriminazioni razziali, linguistiche e culturali), o da aspirazioni personali (condizioni più convenienti di lavoro, un maggiore riconoscimento del proprio ruolo sociale, migliori condizioni economiche, migliore qualità della vita per sé e per i propri familiari). Si è parlato per la prima volta di

In Trentino-Alto Adige, Friuli-Venezia Giulia, Valle d'Aosta, Emilia, Toscana, Umbria e Lazio la presenza degli stranieri è ugualmente rilevante in tutto il territorio, mentre in Piemonte, Liguria, Lombardia, Veneto, Romagna, Marche e Abruzzi, gli stranieri si concentrano lungo alcune direttrici, quali la costa ligure, la costa adriatica, l'asse Bergamo-Venezia, e la zona tra Milano e la Svizzera. Anche se in Sicilia la presenza degli stranieri è più rarefatta, è possibile individuare una maggiore concentrazione lungo la costa occidentale, nell'arco tra Palermo e Agrigento, e una zona lungo la costa orientale, tra Messina e Gela. Nel Mezzogiorno infine, dove la presenza di stranieri è particolarmente scarsa, si possono identificare alcune zone limitate di concentrazione: in Campania sulla costa tra Mondragone e Napoli e quella a sud di Battipaglia; lungo la costa adriatica della Puglia, sull'asse Ostuni-Brindisi-Lecce; lungo la costa sudorientale della Calabria; lungo la costa nordoccidentale della Sardegna, tra la Maddalena e Orosei, e quella meridionale intorno a Cagliari. (Questa mappa, come quella di pagina 27, è stata realizzata da Armando Montanari in collaborazione con Carlo Magnarapa, presso il CNUCE di Pisa.)

brain drain quando circa 35 anni fa molti ricercatori, ingegneri e scienziati di ogni disciplina hanno cominciato a trasferirsi dalla Gran Bretagna negli Stati Uniti attratti da migliori condizioni economiche, maggiori possibilità di accesso ai laboratori di ricerca, minori imposizioni fiscali. Successivamente con brain drain si sono indicati i flussi di forza lavoro specializzata dai paesi in via di sviluppo verso quelli economicamente più sviluppati, e in particolare verso gli Stati Uniti. Nel periodo 1961-1975 sono emigrati in quest'ultimo paese circa 60 000 latino-americani: ingegneri, medici e specialisti in varie discipline cui si sono aggiunti altrettanto consistenti arrivi anche dai paesi asiatici. Gli studi condotti sul fenomeno hanno messo in rilievo la sua onerosità per i paesi di provenienza in termini di vanificazione degli investimenti fatti nel settore dell'istruzione e della formazione professionale e di carenza di personale specializzato.

All'inizio degli anni ottanta l'espressione brain drain è andata a indicare forme più complesse di mobilità di personale specializzato. L'importanza di questi nuovi flussi migratori soprattutto nel mercato del lavoro europeo ha superato di gran lunga la loro dimensione quantitativa ed è funzione dei processi di internazionalizzazione dell'economia e delle politiche di decentramento delle imprese. La carenza di dati e una incompleta conoscenza della situazione rendono difficile fare previsioni accurate. È però assai probabile che il fenomeno, dopo un periodo di crescita iniziale, possa stabilizzarsi intorno ai livelli, presumibilmente alti, a cui si attesteranno gli scambi di tecnologie avanzate tra i paesi del Mercato unico europeo.

Il gran numero di laureati e diplomati, emigrato negli ultimi anni dai paesi dell'Europa orientale, non sempre è riuscito a trovare una occupazione adeguata al proprio livello di specializzazione. In questo caso a un fenomeno di brain drain per il paese di provenienza si è aggiunta una situazione di *brain waste* («spreco di cervelli») per coloro che emigravano. Per questi, infatti, in cambio di condizioni di vita non sempre migliori di quelle lasciate nel paese di origine si attivava un ciclo di dequalificazione.

Sebbene sia motivato da altre necessità, ugualmente rilevante e recente è il fenomeno migratorio che interessa quanti, dopo aver passato una vita di lavoro nei paesi dell'Europa centrosettentrionale, decidono di trascorrere gli anni della pensione nelle regioni del Mediterraneo. Il fenomeno ha avuto inizio, in un primo tempo, a livello nazionale: inglesi e francesi (soprattutto parigini) hanno cominciato a trasferirsi sulle coste meridionali del proprio paese; poi, negli ultimi anni, questa «migrazione» ha assunto carattere internazionale. Le mete preferite sono la Costa del Sol, la Costa Blanca e le Isole Canarie, in Spagna; la regione dell'Algarve, in Portogallo; la Toscana, in Italia. Si tratta di trasferimenti per lo più temporanei e quindi difficilmente quantificabili.

Nel centro turistico di Benidorm, sulla Costa Blanca, nelle giornate assolate del tiepido inverno mediterraneo si rimane sorpresi dalla grande quantità di anziani in movimento. Le autorità di Benidorm valutano in 220 000 le presenze medie giornaliere invernali di anziani provenienti dal resto d'Europa o dalle grandi città dell'entroterra spagnolo. Si tratta di persone che si fermano in media una o due settimane, ma che possono rimanere anche per periodi più lunghi. In altre località della costa spagnola questi stranieri si fermano per alcuni mesi oppure vi si stabiliscono definitivamente, pur mantenendo a volte la residenza nel paese di origine cosicché, anche in questo caso, è difficile conoscere il numero degli immigrati, le loro caratteristiche e le loro abitudini. Sulla base di alcune inchieste realizzate a campione il loro numero potrebbe ammontare a poco più di un milione e mezzo. Non mancano anche in questo tipo di migrazioni situazioni di conflit-

Nel periodo 1950-1990 gli immigrati nella Germania Federale dalla Repubblica Democratica Tedesca (*Übersiedler*) e quelli di etnia tedesca dai paesi dell'Europa orientale (*Aussiedler*) è stato molto consistente, circa 5 200 000 persone. Si può dividere questo periodo in tre fasi. La prima si conclude con il 1961, anno della costruzione del Muro di Berlino. Tra il 1961 e il 1988 la media annuale di immigrati è stata dell'ordine di 10 000 persone. Nell'ultimo periodo di non più di 12 mesi gli immigrati sono stati 538 000. Il numero di *Aussiedler* è rimasto abbastanza contenuto durante gli anni cinquanta e sessanta con l'eccezione degli anni 1957-1958 quando sono immigrate circa 200 000 persone per la maggior parte dalla Polonia. Tra il 1950 e il 1987 sono immigrati 1 420 000 *Aussiedler*, di cui il 60 per cento dalla Polonia, il 14 per cento dalla Romania, l'8 per cento dall'Unione Sovietica, il 7 per cento dalla Cecoslovacchia, il 6 per cento dalla Iugoslavia e l'1 per cento dall'Ungheria.

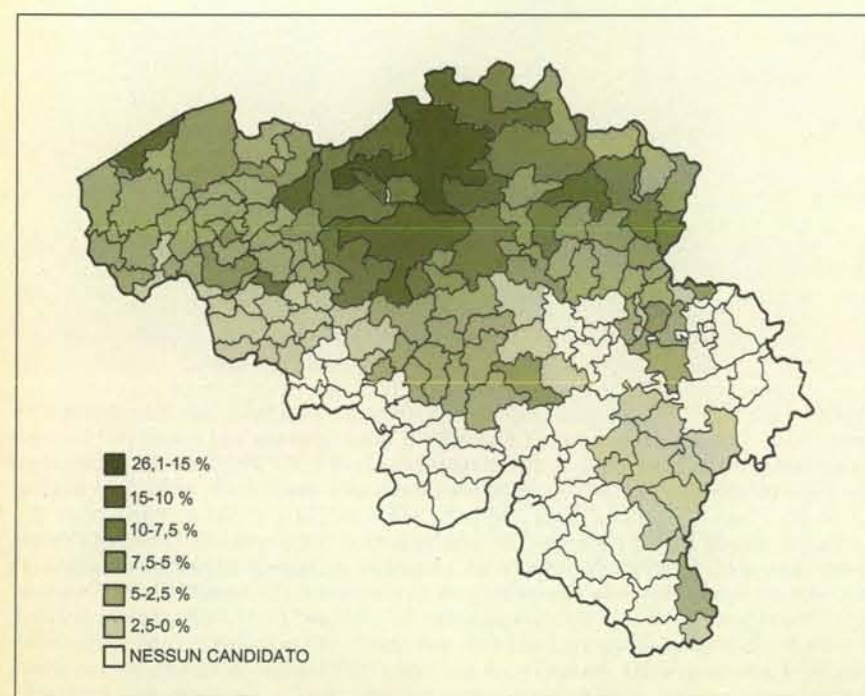
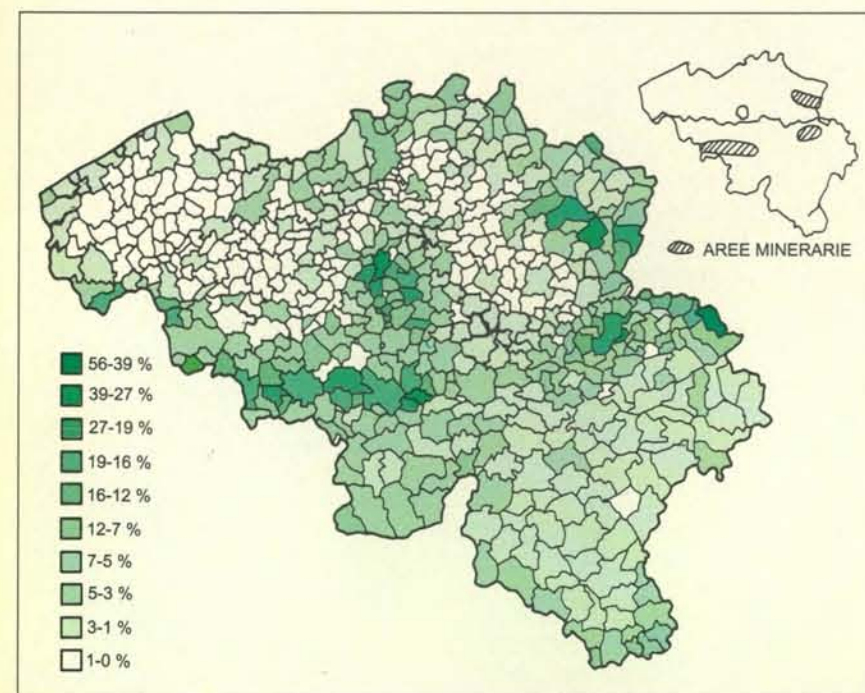
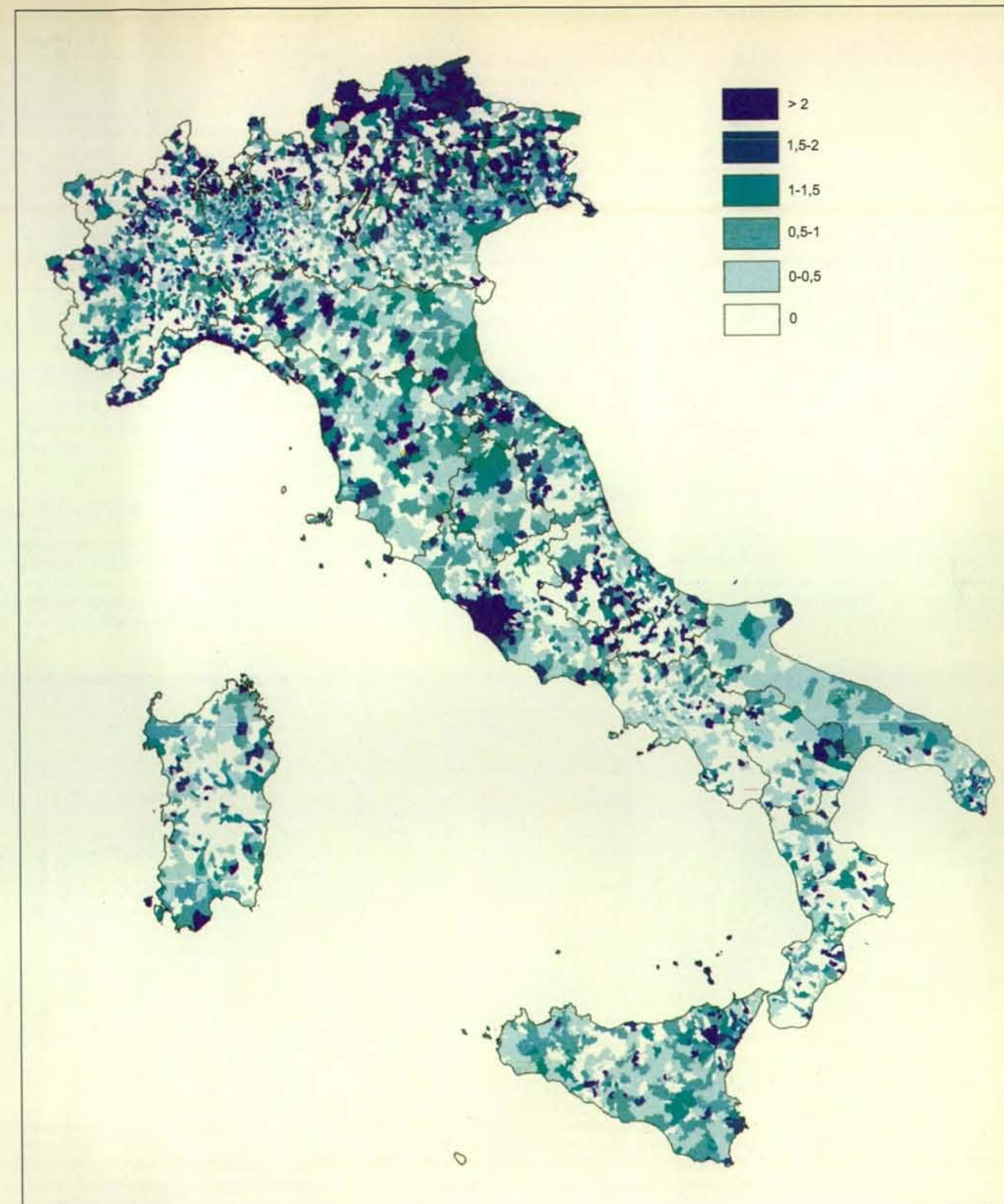
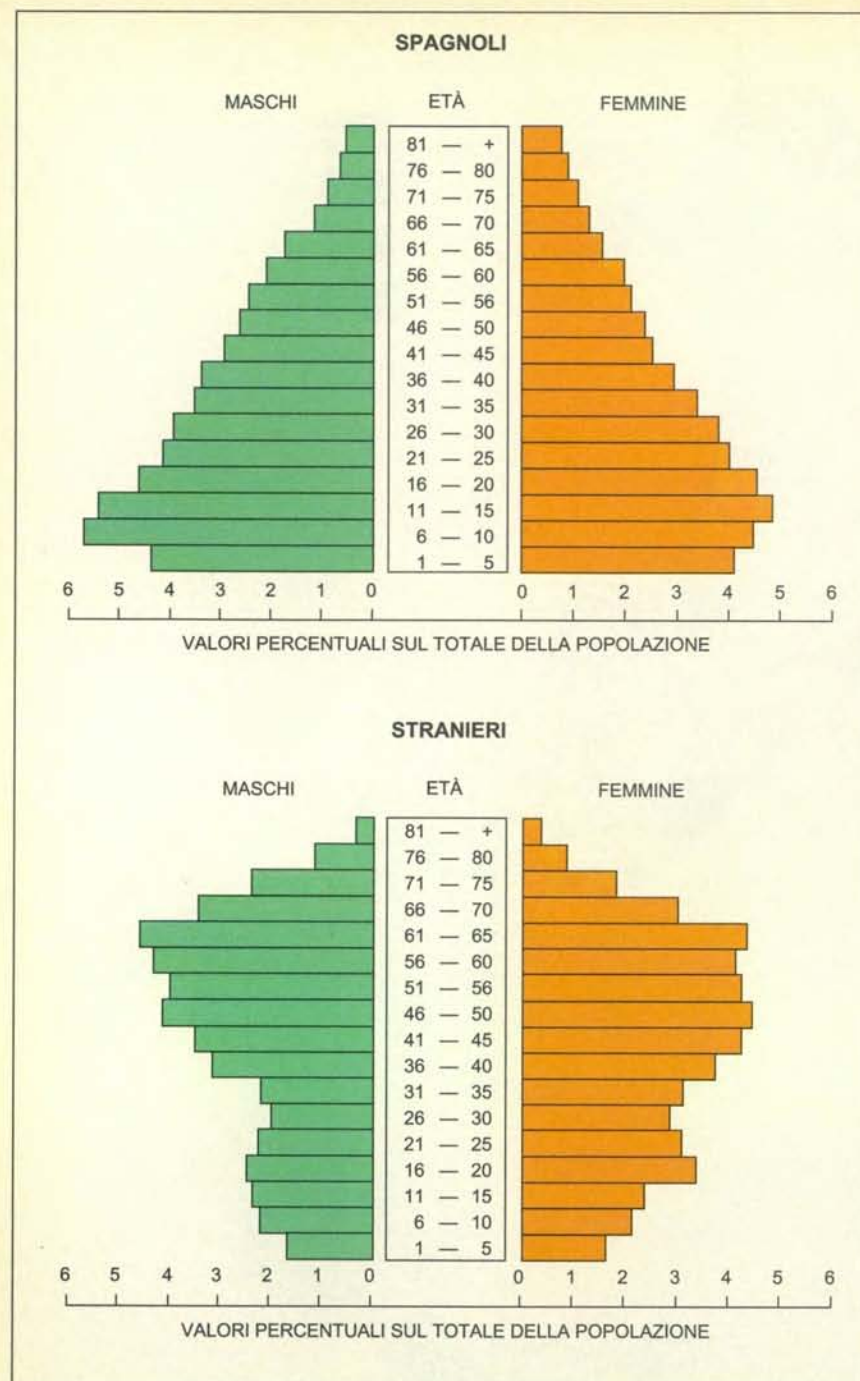
tualità e di xenofobia analoghe a quelle che si riscontrano a proposito di altre categorie di immigrati. In particolare, viene contestato agli stranieri il diritto di voto nelle elezioni locali in quella miriade di comuni turistici, come per esempio Mijas e Alfàs del Pi, dove la loro presenza supera abbondantemente il 50 per cento della popolazione.

A pochi mesi dalla firma del trattato di Marrakech (aprile 1994) che conclude i sette anni di negoziati dell'Uruguay Round e dalla creazione della World Trade Organisation appare sorprendente che in un appuntamento di tale importanza non si sia affatto considerato come la politica commerciale e la politica migratoria afferiscano entrambe alla medesima sfera di relazioni commerciali tra gli Stati. Purtroppo finora i paesi economicamente più sviluppati hanno gestito le due politiche in modo del tutto contraddittorio. La creazione del North America Free Trade Agreement (NAFTA) fra Canada, Stati Uniti e Messico è in parte giustificata dalla necessità di ridurre la pressione migratoria sul confine del Rio Grande tra Messico e Stati Uniti e sostituire l'importazione di manodopera messicana con l'importazione di manufatti prodotti in Messico. Non sembra che tale politica sia stata finora presa in considerazione dai paesi dell'Unione europea nelle loro relazioni commerciali sia con i paesi dell'Est sia con quelli del Sud.

Si prevede che, da ora all'anno 2000, nei paesi della sponda africana del Mediterraneo si avrà un aumento della popolazione in età da lavoro, ossia fra i 15 e i 64 anni, di oltre 30 milioni, di cui il 43 per cento in Egitto, e che, fra il 2000 e il 2020 si aggiungeranno altri 50 milioni di individui, di cui il 37 per cento in Egitto e il 28 per cento in Algeria. Per mantenere costante il tasso di occupazione attuale, il prodotto interno lordo (PIL) di questi paesi mediterranei dovrebbe aumentare in alcuni casi di ben oltre il 10 per cento all'anno: valori assolutamente al di sopra delle loro possibilità - basti pensare che negli ultimi anni il loro prodotto interno lordo ha registrato aumenti di sole poche unità - a meno di consistenti appoggi esterni e di politiche di intervento straordinarie. In questa situazione è realistico prevedere che la manodopera in eccesso prenderà la strada dell'emigrazione.

Sebbene questi fenomeni migratori traggano prevalentemente origine da motivazioni economiche sono destinati, nel corso del tempo, ad autoalimentarsi sulla base di ricongiungimenti familiari, di spirito di solidarietà tra quanti provengono dallo stesso villaggio o regione, e di attività controllate da connazionali. Queste migrazioni creano così un tessuto connettivo fra le diverse nazioni fondato su motivazioni di carattere prevalentemente sociale e quindi relativamente indipendente dagli stimoli economici o dalla volontà degli Stati.

Per di più, i fenomeni di crescita economica nei paesi di emigrazione, al di là dei benefici effetti che potranno portare a lungo termine, determineranno sicura-

AREE MINERARIE
56-39 %
39-27 %
27-19 %
19-16 %
16-12 %
12-7 %
7-5 %
5-3 %
3-1 %
1-0 %

Queste due cartine del Belgio, di cui la prima basata sul numero di cittadini stranieri per 100 abitanti per comune secondo i dati del 1989 e la seconda sulla percentuale di voti ricevuti dai partiti dell'estrema destra alle elezioni del 24 novembre 1991, permettono di vedere come nei paesi dell'Europa occidentale la massiccia presenza di immigrati provenienti dai paesi islamici del Mediterraneo, e negli ulitmi anni anche dai paesi dell'Europa orientale, abbia favorito il successo di quelle forze politiche. La composizione dell'elettorato di questi partiti si è infatti modificata sia da un punto di vista geografico, sia da un punto di vista sociale, allargandosi dalle classi medie e alte, che costituivano il tradizionale serbatoio di voti, alla piccola borghesia, ai piccoli imprenditori e commercianti, e agli operai residenti nelle aree periferiche e nei centri degradati.

In Italia nel periodo 1981-1990 il tasso annuo di emigrazione di laureati e diplomati ha superato il valore 2 per 10 000 abitanti in oltre 1000 Comuni; di questi circa il 70 per cento si trova nelle regioni dell'Italia settentrionale: 70 Comuni nella Provincia di Bolzano; 50 nelle Province di Vercelli, Novara, Imperia, Varese, Milano, Bergamo, Udine; una ventina nelle Province di Cuneo, Alessandria, Genova, Sondrio, Belluno e Pordenone, nell'Italia settentrionale, e nelle Province di Pesaro e Urbino, Roma, L'Aquila, Chieti, Campobasso e Messina nell'Italia centromeridionale. Tra i Comuni che registrano il più alto tasso di emigrazione ve ne sono di rilevanti dal punto di vista della produzione industriale come, per esempio, Grugnasco e Ivrea, in Piemonte, Gallarate, Erba, Saronno, Arese, Monza, San Donato Milanese, Segrate, Vimercate, in Lombardia, così come Ispra, sede di un centro di ricerca internazionale. Significativa anche la presenza di comuni turistici, come le stazioni lacuali di Stresa, Verbania e Campione d'Italia, e i centri balneari di Bordighera, Ospedaletti, Ventimiglia, Diano Marina, San Remo, Alassio, Albissola, Chiavari, Rapallo e Lerici, in Liguria, e Taormina e Giardini-Naxos, in Sicilia.

Il confronto fra le due piramidi della popolazione presente nel Comune di Mijas, in Andalusia, è indicativo di un fenomeno migratorio particolare: oltre all'afflusso di cittadini spagnoli, molti stranieri si trasferiscono nelle località costiere del Mediterraneo per mesi o anche definitivamente una volta cessata l'attività lavorativa.

mente profonde trasformazioni in quelle società in cui il numero di occupati in agricoltura è tuttora rimasto stabile, o addirittura cresciuto, in valori assoluti, negli ultimi decenni. A breve termine queste trasformazioni innescheranno una maggiore mobilità sul territorio nazionale, fenomeni di urbanizzazione, modifiche negli stili di vita e nei consumi e, infine, una maggiore propensione alla migrazione internazionale.

Sulla base di parametri prevalentemente economici è stato ipotizzato che la quota massima di stranieri in Europa non dovrebbe superare nell'anno 2010 il 10 per cento della forza lavoro, cioè circa 13 milioni di unità. Escludendo il numero di lavoratori stranieri già immigrati, ciò porterebbe a una quota annuale assorbibile da parte dei paesi europei dell'ordine di 300 000 unità all'anno.

Non sempre chi risiede nei paesi di immigrazione percepisce che i flussi migratori possano risultare vantaggiosi soprattutto per quei paesi industrializzati in cui il tasso di natalità è basso. La forte crescita degli immigrati - forse anche per la notevole presenza di clandestini, legata spesso a politiche nazionali e comunitarie inadeguate - ha determinato nell'opinione pubblica europea intense reazioni politiche e psicologiche di fronte a una presunta invasione straniera ritenuta pericolosa per il mantenimento della propria identità culturale. Tale atteggiamento interessa probabilmente un numero di cittadini europei assai maggiore di quanto non facciano pensare le adesioni ai partiti di estrema destra o addirittura dichiaratamente xenofobi. Poiché il limite di capacità di assorbimento dei paesi europei non sarà quindi tanto di carattere fisico o economico, quanto piuttosto di tipo psicologico e sociale, i criteri da seguire nel regolare i flussi immigratori dovranno fare riferimento alla tipologia degli immigrati: qualificazione, eterogeneità culturale e religiosa, caratteristiche sociali e politiche dei paesi di provenienza e, infine, concentrazione nei nuovi territori di insediamento.

Un atteggiamento psicologico meno ostile non potrà maturare se le politiche governative non dimostreranno di saper controllare i flussi clandestini e di poter gestire i problemi socioeconomici posti dai nuovi arrivati.

BIBLIOGRAFIA

JURDAO F. e SÁNCHEZ M., *España, Asilo de Europa*, Editorial Planeta, Barcelona, 1990.

BIGGIN S. e KOUZMINOV V. (a cura), *Proceedings of the International Seminar on* «Brain Drain Issue in Europe», UNESCO-ROSTE, Venezia, 1993.

CRIBIER F. e DIELEMAN F. (a cura), *Les Migrations de Personnes Âgée en Europe - Migrations among the Elderly in Europe*, «Espace, Populations, Societes», 3, 1993.

KING R. (a cura), *Mass Migration in Europe: the Legacy and the Future*, Belhaven Press, Londra, 1993.

KING R. (a cura), *The New Geography of European Migrations*, Belhaven Press, Londra, 1993.

MONTANARI A., *Migrazioni Sud-Nord: la situazione italiana nel contesto della regione mediterranea* in «Bollettino della Società Geografica Italiana», 1, gennaio-marzo 1993.

MONTANARI A., *La geografia del Brain Drain. Il caso dell'Italia nel contesto internazionale* in «Rivista Geografica Italiana», 3, settembre 1993.

BARILE G. DAL LAGO A., MARCHETTI A. e GALEAZZO P., *Tra le due rive. La nuova immigrazione a Milano*, Franco Angeli, Milano, 1994.

L'astronomia nell'ultravioletto estremo

Le osservazioni da satellite a queste lunghezze d'onda, un tempo ritenute impossibili a causa dell'assorbimento da parte del mezzo interstellare, consentono di ampliare enormemente la nostra conoscenza dell'universo

di Stuart Bowyer

A mezzogiorno del 7 giugno 1992, teso per l'ansia, osservavo un razzo Delta II sollevarsi dalla rampa di lancio a Cape Canaveral, in Florida, con a bordo il satellite *Extreme Ultraviolet Explorer* (*EUVE*) della National Aeronautics and Space Administration. Circa un'ora dopo il vettore collocava *EUVE* in orbita a 550 chilometri di quota.

Le prestazioni del satellite sono andate al di là delle più rosee speranze. Innalzandosi oltre l'atmosfera, che impedisce alla radiazione ultravioletta estrema di raggiungere i telescopi a terra, *EUVE* ha rilevato una vasta gamma di oggetti astronomici che emettono in questo intervallo di frequenze; tra questi vi sono nane bianche, stelle a corona attiva, stelle di neutroni e corpi planetari del sistema solare. Il satellite ha persino individuato 10 sorgenti di radiazione ultravioletta estrema esterne alla Via Lattea, un'osservazione tanto più gratificante in quanto sfatava la previsione tradizionale secondo la quale il gas interstellare assorbirebbe completamente la radiazione nell'ultravioletto estremo emessa dalle stelle vicine, e a maggior ragione quella degli oggetti extragalattici.

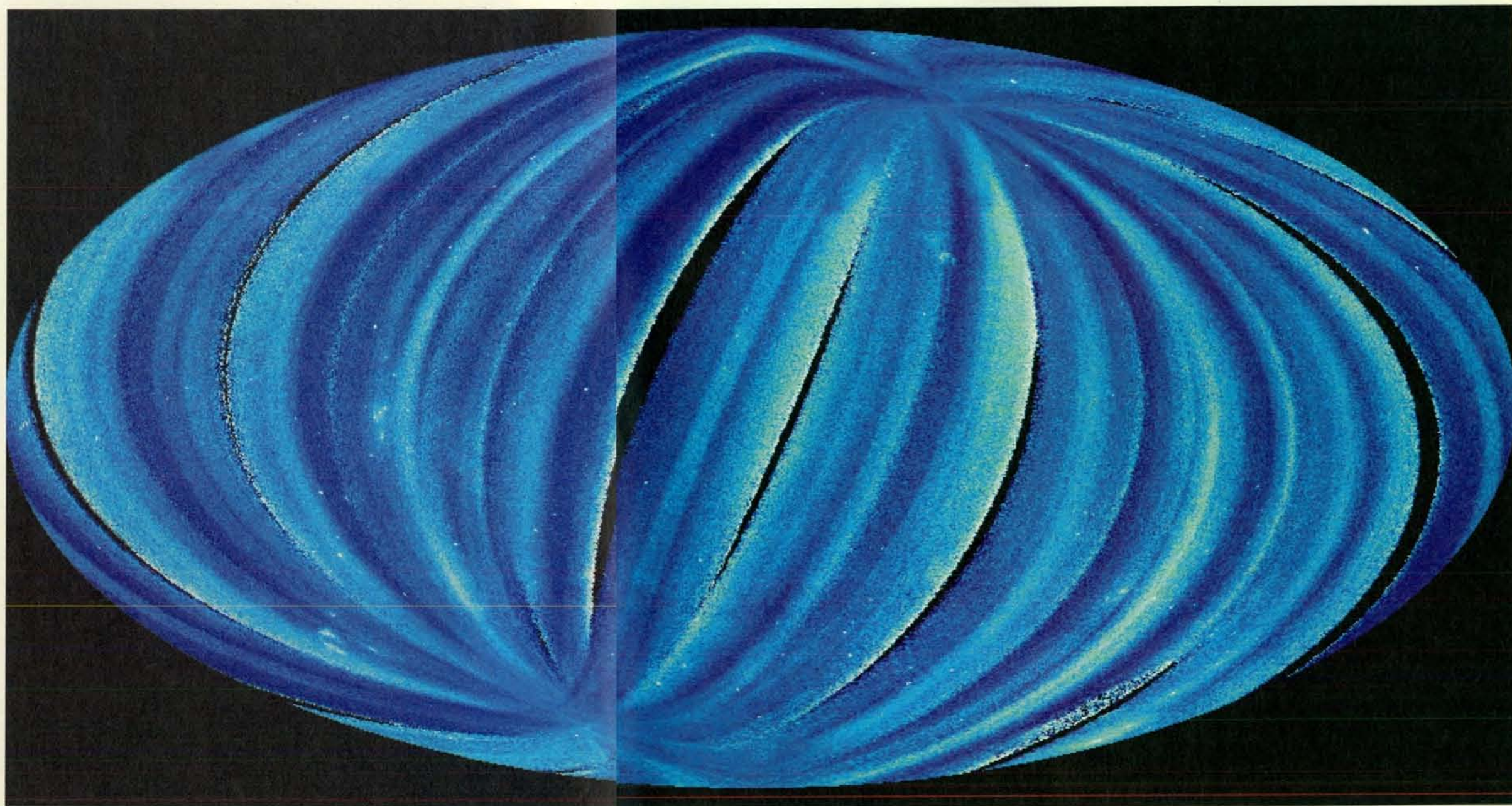
Primo satellite dedicato all'astronomia nell'ultravioletto estremo, nei suoi due anni di funzionamento *EUVE* ha già raccolto informazioni importantissime su un gran numero di oggetti astronomici, costringendoci a rivedere i modelli tradizionali delle stelle giovani calde e delle nane bianche, e fornendoci dati nuovi sulle corone stellari, sul mezzo interstellare e sui pianeti del sistema solare.

Per me e per tutti coloro con cui ho collaborato nel realizzare l'astronomia nell'ultravioletto estremo, *EUVE* e le sue scoperte costituiscono il coronamento di un sogno che risale a più di vent'anni or sono; assistere alla realizzazione delle nostre speranze è stato ancora più soddisfacente perché si è sfatata la previsione secondo la quale l'astronomia nell'ultravioletto estremo sarebbe stata una scienza votata al fallimento.

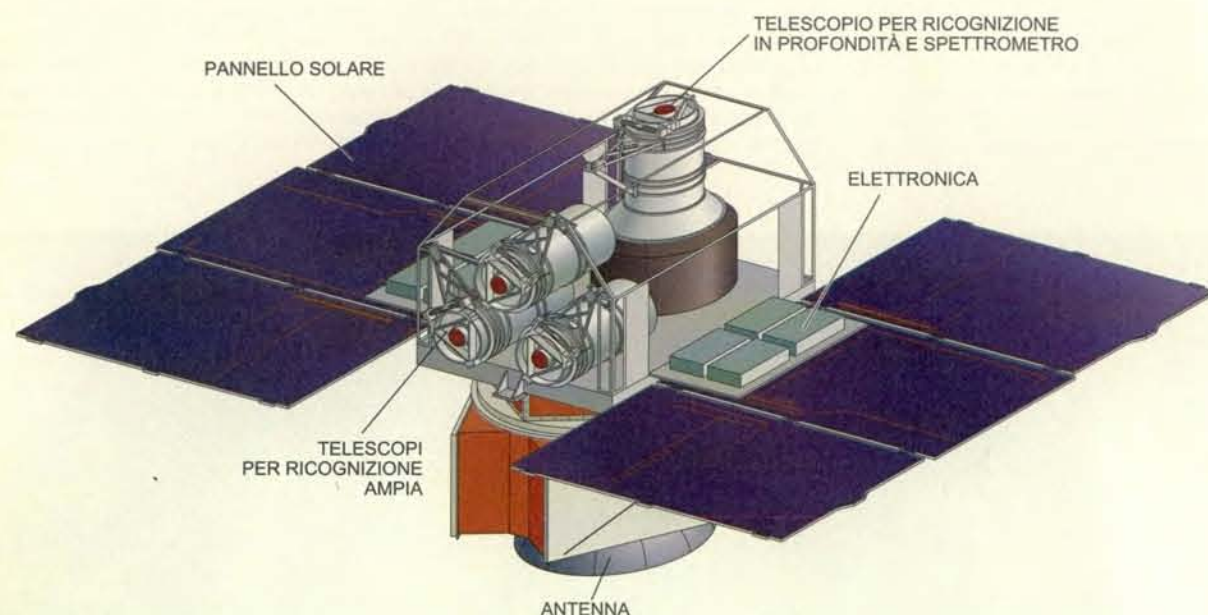
Negli anni sessanta e nei primi anni settanta si credeva infatti che la radiazione ultravioletta estrema - con lunghezza d'onda compresa fra 10 e 100 nanometri circa - fosse assorbita completamente dal mezzo interstellare. Radiazione di questo tipo proveniente da qualsiasi stella diversa dal Sole non avrebbe quindi potuto raggiungere la Terra. Questa conclusione si basava su una stima della densità media del gas nello spazio interstellare pari a un atomo di idrogeno per centimetro cubo, oltre a quantità inferiori di elio e altri elementi. Se questa materia fosse distribuita uniformemente per tutta la Galassia, in effetti l'astronomia nell'ultravioletto estremo sarebbe davvero impossibile.

Esisteva poi un problema tecnico: gli strumenti necessari a rilevare e analizzare la radiazione ultravioletta estrema - anche solo in laboratorio, per non parlare della possibilità di installarli a bordo di un razzo o di un satellite - non esistevano, o erano a un livello molto rozzo. La combinazione di questi fattori faceva dell'ultravioletto estremo l'ultima frontiera dell'astronomia osservativa.

Ma quella frontiera mi attirava irresistibilmente: subito dopo aver terminato i miei studi di fisica con una tesi sull'astronomia nei raggi X, mi dedicai alla realizzazione di un apparecchio rudimentale in grado di rilevare la radiazione ultravioletta estrema. Sarebbe stato possibile impiegare questa tecnologia in ambito astronomico? Non avendo compiuto studi formali di astronomia, il pessimismo canonico non mi spaventava troppo, anche se era sicuramente una fonte di preoccupazione.

Così appare il cielo notturno nell'ultravioletto estremo a piccola lunghezza d'onda (circa 10 nanometri). Questa immagine combina i risultati di sei mesi di osservazioni effettuate dal satellite *Extreme Ultraviolet Explorer* (*EUVE*). Ogni striscia rappresenta una fase continua di raccolta dei dati; le strisce nere, che corrispondono a periodi in cui la ricognizione era sospesa per eseguire calibrazioni, sono state colmate da osservazioni successive. La struttura circolare in basso a sinistra è il resto di supernova della Vela, mentre al centro, sulla sinistra, si vede la cintura di Orione.

Il satellite *EUVE*

Lanciato nel giugno del 1992, il satellite *EUVE* è stato concepito per effettuare osservazioni astronomiche nell'ultravioletto estremo; l'illustrazione lo rappresenta senza la copertura esterna isolante. I tre telescopi per la ricognizione ampia sono puntati perpendicolarmente all'asse di rotazione del satellite (*verticale*). L'asse giace nel piano dell'eclittica - quello dell'orbita terrestre intorno al Sole - e punta verso il Sole. Via via che il satellite ruota i tre telescopi osservano il cielo in senso perpendicolare all'asse di rotazione; la copertura completa del cielo richiede sei mesi.

Il quarto telescopio, per la ricognizione in profondità, è puntato lungo l'asse di rotazione e osserva una piccola striscia di cielo nella direzione opposta al Sole; il tempo di esposizione è decisamente più lungo e permette di rilevare sorgenti più deboli. Le osservazioni di *EUVE* continueranno fino a tutto il 1995, ma il satellite dovrebbe rimanere in orbita almeno fino al 1999.

Appena giunsi all'Università della California a Berkeley nel 1967, George B. Field, uno dei massimi esperti sulla natura del mezzo interstellare, avanzò l'ipotesi che la materia interstellare fosse distribuita in modo molto disomogeneo, tanto che in molte direzioni la sua densità avrebbe potuto essere pari a un decimo appena di quella media. Se questo fosse stato vero, la radiazione ultravioletta estrema si sarebbe propagata, in queste particolari direzioni, dieci volte più lontano di quanto non si pensasse, e il volume di spazio osservabile a queste lunghezze d'onda avrebbe potuto aumentare di 1000 volte. Questo corrispondeva a un aumento di 1000 volte del numero di possibili sorgenti! Mi dissi che «se a George Field basta uno schiocco teorico delle dita per ampliare di 1000 volte la portata delle osservazioni, chi può dire che cosa sia possibile in pratica?». Decisi che l'astronomia nell'ultravioletto estremo era una disciplina che tutto sommato avrei fatto bene a coltivare.

Dal 1968 dirigo un gruppo di ricerca a Berkeley che si occupa soprattutto di astronomia nell'ultravioletto estremo. Qui sono riuscito ad attrarre tutta una serie di giovani ricercatori dotati di grande talento e spirito di avventura.

Nei primi tempi fu arduo convincere gli astronomi, e soprattutto la NASA, ad appoggiare i tentativi per superare le difficoltà tecniche che si opponevano all'astronomia nell'ultravioletto estremo, ma alla fine la NASA mi concesse un piccolo finanziamento. Mi concentrai quindi sui razzi sonda - veicoli che rimanevano al di sopra dell'atmosfera per soli cinque essenziali minuti prima di ricadere a terra - come mezzo per collaudare e valutare la nuova tecnologia per l'astronomia nell'ultravioletto estremo.

Verso la metà degli anni settanta diressi il progetto di un telescopio, primitivo secondo i criteri odierni, che realizzasse osservazioni nell'ultravioletto estremo durante il volo congiunto sovietico-statunitense Apollo-Sojuz. La NASA approvò la nostra proposta e nel 1975 la missione portò il nostro strumento oltre l'atmosfera. Trovammo quattro sorgenti ultraviolette estreme, due delle quali si rivelarono nane bianche calde e la terza una stella a corona attiva; la quarta era SS Cygni, una variabile cataclismica, ossia una stella binaria che di tanto in tanto aumenta la propria luminosità di 5-100 volte. Dato che le nane bianche e SS Cygni distano da 100 a 200 anni luce, l'esperimento dimostrò che la radiazione ultravioletta estrema può attraversare il mezzo interstellare anche per distanze astronomiche, almeno in certe direzioni.

Il successo della missione ci diede una forte spinta in avanti. In risposta all'annuncio, da parte della NASA, di un programma per satelliti di esplorazione, presentammo una proposta per realizzare strumenti in grado di cartografare tutto il cielo nell'ultravioletto estremo. La NASA la approvò, e cominciarono quindi gli anni di sforzi che sarebbero culminati con l'*Extreme Ultraviolet Explorer*.

Gli ostacoli non erano solo tecnologici: all'inizio vincoli finanziari limitarono l'entità dei fondi erogati. Per di più, nonostante il successo delle osservazioni Apollo-Sojuz, nel 1979 un rapporto della National Academy of Sciences consigliò alla NASA di annullare *EUVE*, in quanto probabilmente la missione avrebbe rilevato non più di una decina di sorgenti ultraviolette estreme. Va a onore della NASA l'aver continuato a sostenere il nostro lavoro.

Le difficoltà tecniche si dimostrarono davvero notevoli. Per mettere a fuoco, rivelare e analizzare la radiazione ultravioletta estrema occorrono strumenti molto diversi da quelli usati per la luce visibile. Per esempio i migliori telescopi ottici impiegano specchi che raccolgono e mettono a fuoco la luce riflettendola a grandi angoli; se però la lunghezza d'onda della radiazione è inferiore a 50 nanometri circa, gli specchi di questo tipo la assorbono invece di rifletterla.

Per risolvere questo problema l'astronomia X aveva già cominciato a impiegare telescopi a «incidenza radente», nei quali la radiazione incide sullo specchio a un angolo molto piccolo, cioè quasi parallelamente alla superficie dello specchio, e ne viene riflessa a un angolo altrettanto piccolo (*si veda l'illustrazione a pagina 34*). Un simile trucco si può applicare anche alla radiazione ultravioletta estrema, ma specchi di questo tipo sono estremamente difficili da lavorare. Bisogna sagomare e lucidare le superfici dello specchio con precisione minuziosa e senza poter usare le tecniche relativamente economiche impiegate per fabbricare telescopi ottici.

Foggiare e lucidare superfici di vetro per uno strumento a incidenza radente per l'ultravioletto estremo aveva un costo proibitivo, considerando che questa disciplina doveva ancora dimostrare il proprio valore. A Berkeley assegnai a Webster C. Cash, Roger F. Malina e David S. Finley il compito di realizzare specchi di metallo; questi furono costruiti a partire da superfici di alluminio sagomate con gran cura, nichelate per facilitarne la lucidatura e poi ricoperte di uno strato sottile di oro per aumentarne la riflettività.

Avemmo la fortuna di poter ricorrere per questo progetto all'aiuto del Lawrence Livermore National Laboratory. Utilizzando torni a diamante messi a punto in origine per la fabbricazione di armi nucleari, riuscimmo a realizzare specchi con caratteristiche molto migliori di quelle di esemplari analoghi fabbricati altrove. Alla fine i nostri specchi risultarono quasi altrettanto buoni di quello di vetro installato nel 1978 sul satellite *Einstein* per raggi X, il cui costo fu quasi 30 volte superiore.

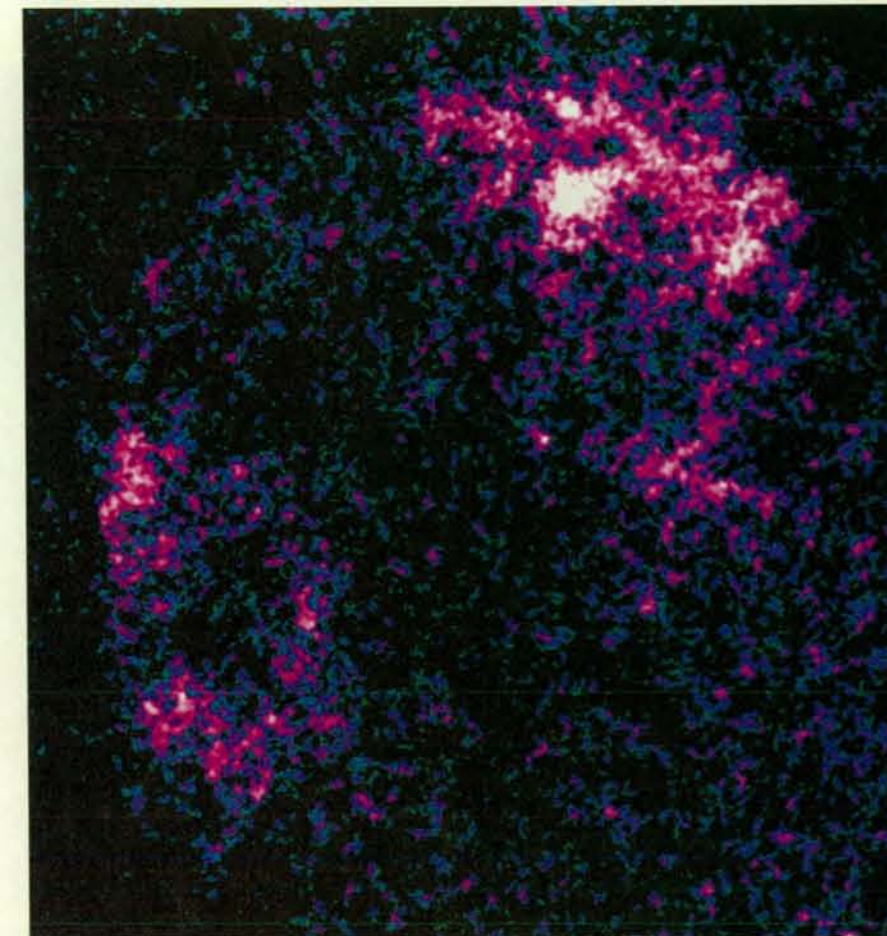
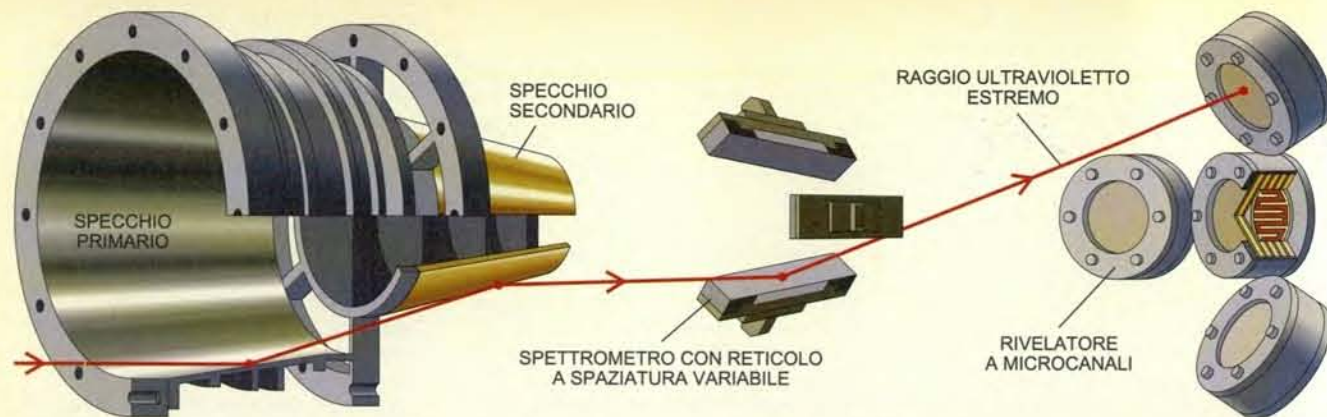
La realizzazione degli specchi a incidenza radente per l'*EUVE* fu solo un primo passo. Dovemmo anche inventare e mettere a punto rivelatori per la radiazione ultravioletta estrema che i telescopi avrebbero raccolto. Il mio gruppo di ricerca progettò diversi rivelatori, basati tutti su un unico principio. I fotoni incidenti privano un atomo di un elettrone, che accelera lungo un capillare - facente parte, con molti altri, di una struttura ad alveare - e urta altri elettroni, liberandoli; questi strappano ancora altri elettroni, producendo una cascata di molti milioni di elettroni a partire da quello iniziale.

Questo meccanismo trova impiego in numerosi sistemi per la visione notturna di uso militare e civile, ma applicarlo all'astronomia ultravioletta non era affatto facile. Le sorgenti ultraviolette estreme, come quasi tutti gli oggetti astronomici, sono incredibilmente deboli; dovevamo quindi realizzare uno strumento di sensibilità elevatissima, capace di rilevare anche un solo fotone. Nonostante questa sensibilità, però, il dispositivo doveva produrre un minimo di segnali casuali spuri. Inoltre ci serviva un sistema per convertire la cascata di elettroni in un segnale elettronico che riproducesse fedelmente l'immagine.

Michael Lampton, uno dei miei primi collaboratori, escogitò vari metodi per riprodurre immagini del cielo a partire dai segnali raccolti. Il rivelatore che usammo per *EUVE* genera una immagine costituita da una matrice quadrata di 2048 pixel di lato; esso ha un rumore interno molto basso ed è quasi insensibile alla radiazione ultravioletta di lunghezza d'onda maggiore (si veda l'articolo *L'intensificatore di immagine a microcanali* di Michael Lampton in «Le Scienze» n. 161, gennaio 1982).

I telescopi e il rivelatore, però, non erano tutto. Sapevo che, nel lungo termine, la spettroscopia - cioè l'analisi della distribuzione della radiazione alle varie lunghezze d'onda - sarebbe stata importantissima per lo sviluppo dell'astronomia nell'ultravioletto estremo, proprio come era accaduto in tutti gli altri campi della ricerca astronomica. Impegnai quindi quattro dottorandi, Malina, Patrick Jelinsky, Michael Hettrick e Mark V. Hurwitz, nella costruzione di alcuni spettrometri per l'ultravioletto estremo.

Il cuore del dispositivo che uscì da questo lavoro è un reticolo di diffrazione molto particolare, nel quale la spaziatura tra righe adiacenti aumenta progressivamente da un'estremità all'altra. Questo spettrometro con «reticolo a spaziatura variabile» disperde la luce in maniera tale da offrire speciali vantaggi: in particolare, ha un'efficienza elevata, è compatto e si adatta facilmente a telescopi diversi.

Nonostante i successi di laboratorio, tutti i nostri strumenti all'inizio erano progettati per il lancio con razzi sonda. Fu necessario riconfigurarli per soddisfare i requisiti imposti dalla NASA per l'installazione a bordo di *EUVE*. In seguito la NASA pose Malina a capo di un gruppo di scienziati e tecnici che

Il resto di supernova della Vela è uno degli oggetti più brillanti del cielo nell'ultravioletto estremo, ma è molto difficile da osservare nel visibile. Le chiazze luminose corrispondono a gas espulso durante l'esplosione della stella; oggi questo gas forma un guscio in espansione che emette abbondantemente nell'ultravioletto estremo e nei raggi X.

L'astronomia nell'ultravioletto estremo richiede telescopi, spettrometri e rivelatori molto diversi da quelli dell'astronomia ottica. Dato che la radiazione di lunghezza d'onda così piccola viene assorbita dagli specchi usati per i telescopi ottici, è necessario impiegare specchi a «incidenza radente». In quelli qui mostrati, la radiazione incide con un angolo molto piccolo rispetto alla superficie. L'illustrazione mostra un raggio ultravioletto estremo che viene messo a fuoco dagli specchi (mostrati senza copertura) del telescopio per la ricognizione in profondità. Poi la radiazione è dispersa nelle sue componenti da uno speciale reticolo a spaziatura variabile e infine captata da un rivelatore a microcanali capace di individuare anche un singolo fotone.

avevano la responsabilità di eseguire questa trasformazione e di garantire che gli strumenti funzionassero correttamente in orbita.

Nel frattempo le osservazioni compiute dalla missione Apollo-Sojuz avevano risvegliato l'interesse per l'astronomia nell'ultravioletto estremo anche in altri paesi. Un gruppo di astrofisici britannici decise di costruire uno strumento capace di compiere una ricognizione del cielo nella regione di lunghezza d'onda più breve dell'ultravioletto estremo. La loro Wide Field Camera era studiata per essere ospitata a bordo del satellite tedesco *ROSAT*, la cui missione principale era l'osservazione di sorgenti X.

La Wide Field Camera venne approvata ufficialmente nel 1980, quattro anni dopo l'approvazione dell'*EUVE* da parte della NASA, ma il destino volle che lo precedesse in orbita di quasi due anni. Lo strumento individuò 350 sorgenti di radiazione ultravioletta estrema di piccola lunghezza d'onda. Oltre a questo catalogo, i dati permisero anche molte interpretazioni scientifiche sulla natura delle sorgenti (*a questo riguardo si veda la finestra alle pagine 36 e 37*).

All'inizio avevamo previsto di gestire la fase della missione successiva al lancio all'interno di una delle strutture organizzative già disponibili a Berkeley, ma alla fine degli anni ottanta era ormai chiaro che il progetto era troppo vasto per il sito e il personale disponibili. Riuscii quindi a convincere l'università a fondare il Center for Extreme Ultraviolet Astrophysics (CEA). Gli scienziati e i tecnici del CEA seguono lo stato di salute degli strumenti di *EUVE*, ne controllano il funzionamento e analizzano i dati raccolti nella prima fase delle osservazioni, oltre a offrire supporto agli «osservatori ospiti» della NASA, astronomi di tutto il mondo che usano lo spettrometro per studi specifici.

La strumentazione di *EUVE* comprende quattro telescopi (*si veda la finestra a pagina 32*). Tre di essi, i telescopi da «ricognizione ampia» puntano nella stessa direzione. In origine li avevamo realizzati in modo che ciascuno osservasse una regione diversa di lunghezze d'onda ultraviolette estreme, tramite filtri speciali messi a punto nel mio laboratorio. In seguito escogitammo un quarto filtro e un sistema di montaggio particolarmente ingegnoso, che ci permetteva di esplorare il cielo nell'ultravioletto estremo in quattro regioni spettrali invece di tre. Procedemmo quindi a riconfigurare i tre telescopi in modo da osservare tutte e quattro le regioni.

Questi tre telescopi puntano in direzione perpendicolare all'asse di rotazione del satellite *EUVE*. Questo asse giace nel piano dell'eclittica - ossia quello dell'orbita terrestre intorno al Sole - e punta verso il Sole. Via via che il satellite ruota su se stesso, i telescopi spazzano una striscia del cielo che cambia di giorno in giorno mentre la Terra procede nella sua orbita; in sei mesi, quindi, si copre tutto il cielo.

Il quarto telescopio, per la «ricognizione in profondità», è allineato parallelamente all'asse di rotazione di *EUVE* e puntato in direzione opposta al Sole. Nell'arco di sei mesi questo strumento osserva una piccola striscia di cielo nel piano dell'eclittica. L'esposizione più lunga assicura una sensibilità maggiore di quella della ricognizione ampia, e quindi permette di rilevare sorgenti più deboli. Metà della radiazione incidente serve per la ricognizione in profondità; l'altra metà è divisa in parti uguali fra i tre spettrometri. Dato che ciascun reticolo riesce a riflettere con buona efficienza solo radiazione le cui lunghezze d'onda differiscono di un fattore due o tre, occorrono tre spettrometri per coprire tutta la regione dell'ultravioletto estremo.

Nel gennaio 1993 *EUVE* terminò le prime ricognizioni del cielo che abbracciavano tutto l'ultravioletto estremo. Per analizzare la quantità enorme di dati provenienti dal satellite fummo costretti ad affrontare un problema ben noto. Oltre che ai fotoni dell'ultravioletto estremo, i nostri rivelatori sono sensibili ai raggi cosmici e alle particelle cariche catturate dal campo magnetico terrestre. Queste particelle provocano un rumore di fondo nel quale sono immersi i deboli segnali astronomici che ci interessano.

Con uno sforzo notevole riuscimmo a elaborare algoritmi affidabili per distinguere le sorgenti vere da quelle spurie. Grazie a questi programmi abbiamo completato l'elaborazione iniziale dei dati della ricognizione ampia, identificando più di 400 sorgenti distinte. Nel successivo ciclo di analisi, ormai in via di conclusione, abbiamo applicato tecniche ancora più raffinate, che dovrebbero rivelare fino a 1000 sorgenti.

I primi risultati indicano che molte delle sorgenti individuate sono stelle a corona attiva e nane bianche calde. Il resto del «bottino» comprende una collezione variegata di oggetti astronomici, dalle variabili cataclismiche alle stelle calde giovani, alle sorgenti extragalattiche, ai resti di supernova e alle stelle di neutroni.

Nel gennaio 1993 *EUVE* è entrato nella seconda fase operativa: lo studio intensivo di particolari sorgenti per mezzo di spettrometri. A questa fase partecipano quegli astronomi che sono riusciti a convincere la NASA del valore delle ricerche da loro proposte. Ciascun osservatore ospite esamina l'oggetto di propria scelta per un arco di tempo compreso tra una decina e un centinaio di ore durante il «periodo di buio» nel quale il cono d'ombra della Terra scherma il satellite dalla radiazione solare. Una delle caratteristiche più notevoli di *EUVE* è la sua capacità di puntare il proprio asse nella direzione voluta, mentre si muove in orbita, con precisione superiore a 10 secondi d'arco (pari alla dimensione angolare di una monetina posta a 700 metri di distanza).

Una delle osservazioni più interessanti realizzate con *EUVE* si deve a un gruppo di astronomi diretti da Arieh Königl dell'Università di Chicago. La scoperta riguarda un oggetto extragalattico, PKS 2155-304 (la sigla PKS indica che fu scoperto per mezzo del radiotelescopio di Parkes, in Australia); si tratta di una galassia ellittica che emette un getto molto brillante di materia calda che sembra puntare verso la Terra. La radiazione proveniente da questo getto supera di gran lunga l'emissione complessiva del resto della nostra galassia.

Si sa che gli oggetti di questo tipo, detti «BL Lac» dal nome di BL Lacertae, il primo a essere scoperto, emettono a quasi tutte le lunghezze d'onda, dai raggi X alle onde radio. Una caratteristica peculiare della loro radiazione è la mancanza quasi totale di righe e altri tratti distintivi, il che rende difficile dedurre lo stato fisico di questi oggetti. Lo spettro raccolto da *EUVE* ha permesso di determinare che PKS 2155-304 è rilevabile fino alla lunghezza d'onda di 12 nanometri. Questa osservazione ha dimostrato che la radiazione ultravioletta estrema, contrariamente a quanto si credeva, riesce ad attraversare distanze intergalattiche. La scoperta più importante, però, è che nello spettro della sorgente si sono trovate diverse caratteristiche distintive in assorbimento. Uno studio approfondito dello spettro fornirà informazioni preziosissime sulle condizioni fisiche di questi oggetti: in particolare, potremmo chiarire in che modo la materia che cade nel buco nero al centro della galassia venga trasformata nel getto relativistico osservato.

Quasi tutte le sorgenti individuate da *EUVE* sono stelle della nostra galassia dotate di una corona attiva. Nelle stelle «normali», come il Sole, la corona è un involucro molto ampio di gas rarefatto, riscaldato fino a una temperatura di uno o due milioni di gradi Celsius, tramite meccanismi sconosciuti, dall'energia trasmessa dagli strati più freddi e densi. Tra la superficie apparente della stella - la fotosfera - e la corona si estende una zona di transizione dove la temperatura sale bruscamente. La radiazione proveniente dalla zona di transizione è costituita in prevalenza da raggi ultravioletti estremi e raggi X; in questa zona però il gas è molto rarefatto, e l'energia totale emessa è solo un milionesimo di quella proveniente dalla fotosfera.

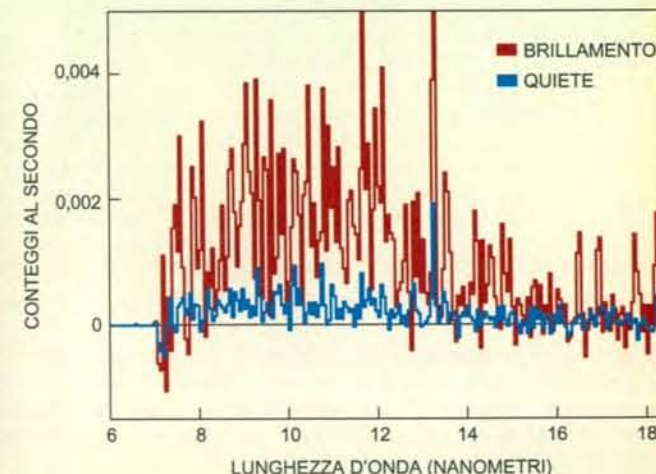
In alcune stelle la corona emette energia in quantità molto superiore a quella usuale, e il plasma emettente ha tipicamente una temperatura più elevata del normale. Queste stelle a corona attiva ci forniscono molte informazioni anche sulla corona e sulla zona di transizione delle stelle simili al Sole.

Andrea K. Dupree dello Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics e colleghi hanno studiato con *EUVE* lo spettro ultravioletto estremo di Capella, un sistema di due stelle giganti gialle a corona attiva che dista 45 anni luce, osservando intense righe in emissione prodotte da ioni ferro che hanno perso da 14 a 23 dei loro 26 elettroni. Queste righe dimostrano per la prima volta che il sistema contiene gas ionizzato (cioè plasma) a temperature comprese tra alcune decine di migliaia di gradi e vari milioni di gradi. Stranamente, si riscontra una carenza di materia a temperature vicine a un milione di gradi, una differenza notevole rispetto al Sole, in cui invece si osserva un'abbondanza di materia a questa temperatura. Che cosa mai potrebbe produrre questa carenza? Finora non è dato saperlo.

La Dupree e colleghi hanno osservato una grande quantità di plasma a temperature vicine a sei milioni di gradi nel sistema di Capella; anche in questo caso non se ne conosce l'origine. Plasma confinato da campi magnetici potrebbe subire fenomeni di fusione presso una o entrambe le stelle, oppure la materia potrebbe essere riscaldata da qualche interazione tra le due stelle. Osservando le variazioni della radiazione ultravioletta estrema emessa da Capella riusciremo forse a stabilire quali meccanismi siano all'opera in questo sistema stellare.

Nel Sole e in altre stelle si verificano spesso brillamenti, ossia lampi improvvisi di radiazione ultravioletta estrema e X. I brillamenti delle stelle a corona attiva sono tanto intensi da far sembrare modesti quelli solari. Meno di sei settimane dopo il lancio di *EUVE* abbiamo osservato due grandi brillamenti nella stella AU Microscopii, posta a circa 30 anni luce di distanza. Nel primo dei due l'emissione della stella nell'ultravioletto estremo è cresciuta di 20 volte in pochi minuti, per poi tornare al livello normale nell'arco di qualche ora. Analizzando con gli spettrometri la radiazione di AU Mic abbiamo notato che lo spettro differisce notevolmente tra la fase di brillamento e quella di quiete (*si veda l'illustrazione in questa pagina*). Speriamo, con ulteriori osservazioni, di riuscire a comprendere meglio questi fenomeni violenti e transitori.

Una sorpresa considerevole scaturita dalla ricognizione ampia di *EUVE* è la scoperta che Epsilon Canis Majoris, una stella giovane e assai calda di gran-

AU Microscopii, una stella a corona attiva, appare in un'immagine a piccola lunghezza d'onda ottenuta dal telescopio per la ricognizione ampia del satellite *EUVE* (*a sinistra*). A destra viene mostrato in diagramma lo spettro della stella nella fase di quiete e durante un brillamento. Quest'ultimo è consistito in un aumento marcato dell'intensità della radiazione ultravioletta estrema, durato circa due ore e seguito da una coda degradante che è continuata per oltre un giorno.

L'astronomia nell'ultravioletto estremo con *ROSAT*

Il satellite *ROSAT* (acronimo di Röntgensatellit), un progetto congiunto tedesco, britannico e statunitense, è stato progettato per eseguire osservazioni nei raggi X e nell'ultravioletto estremo; i due telescopi a bordo hanno una risoluzione superiore a un minuto d'arco e nell'insieme coprono la regione di lunghezze d'onda compresa fra 0,6 e 60 nanometri. Il satellite fu proposto nel 1975 dal Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE) di Garching; la sua missione prevedeva un rilevamento completo del cielo nei raggi X, da eseguire con moderata risoluzione angolare tramite un telescopio dotato di speciali «contatori proporzionali sensibili alla posizione» costruiti dall'MPE.

Dopo che la Germania, nel 1979, ebbe offerto agli altri paesi membri dell'ESA di collaborare a *ROSAT*, l'Università di Leicester propose di dotare il satellite di uno strumento per l'ultravioletto estremo, la Wide Field Camera (WFC), per estenderne le capacità osservative a lunghezze d'onda maggiori. Un altro importante contributo al progetto venne nel 1982 dalla NASA, che fornì l'HRI (High Resolution Imager), da montare nel piano focale del telescopio per raggi X, e si impegnò a lanciare *ROSAT* con lo space shuttle.

La tragedia del *Challenger*, nel gennaio 1986, portò alla decisione di lanciare il satellite con un razzo Delta-II anziché con lo space shuttle. *ROSAT* partì da Cape Canaveral, in Florida, l'1 giugno 1990, e si inserì in un'orbita circolare a circa 575 chilometri di quota e con un'inclinazione di 53 gradi rispetto all'equatore. Lo scopo della missione era duplice: in primo luogo l'effettuazione di scansioni di tutto il cielo nei raggi X (da 0,6 a 8 nanometri) e nell'ultravioletto estremo (da 6 a 20 nanometri), e in secondo luogo osservazioni puntuali per lo studio dettagliato di particolari sorgenti. Il telescopio per raggi X e la Wide Field Camera puntano nella stessa direzione, e il rilevamento viene eseguito spostando i telescopi per coprire tutto il cielo. La scansione iniziò nel luglio 1990 e proseguì senza incidenti fino alla fine di gennaio 1991, quando era stato ormai osservato più del 90 per cento del cielo. Il 25 gennaio 1991, per un guasto nel sistema di controllo dell'assetto, i telescopi di *ROSAT* rimasero puntati brevemente verso il Sole. La Wide Field Camera subì una notevole perdita di sensibilità, ma il satellite poté essere riparato e la missione riprese all'inizio di febbraio con la fase di osservazione di specifiche sorgenti. La scansione totale del cielo fu completata nell'agosto dello stesso anno. Nonostante alcuni problemi di assetto, lo studio di specifiche sorgenti è proseguito con successo e oggi, dopo quattro anni e mezzo di attività, *ROSAT* ha ormai compiuto oltre 4000 osservazioni per astronomi di tutto il mondo.

Fin dalle prime fasi di progettazione si era compreso che la mole di lavoro necessario per mettere a punto la Wide Field Camera avrebbe richiesto il contributo di diverse istituzioni; all'inizio del 1981 venne perciò costituito un consorzio di gruppi dell'Università di Leicester, dell'Università di Birmingham, del Mullard Space Science Laboratory dell'University College di Londra, dell'Imperial College of Science, Technology and Medicine di Londra e del Rutherford Appleton Laboratory del SERC. Il progetto si basava su telescopi analoghi costruiti alla fine degli anni settanta per un programma congiunto di razzi sonda a cui partecipavano l'Università di Leicester e il MIT. La Wide Field Camera consiste in un singolo telescopio dotato di tre specchi a «incidenza radente», di alluminio placcato d'oro, che formano un'immagine sulla stessa superficie focale. La radiazione ultravioletta estrema viene raccolta nel piano focale da un rivelatore a microcanali progettato e costruito all'Università di Leicester.

Nel rivelatore della Wide Field Camera sono state introdotte due innovazioni: le superfici di rivelazione sono curve e rivestite da uno speciale materiale «fotocatodico» (ioduro di cesio) per aumentare la sensibilità. Come accade in molti telescopi, l'immagine migliore si forma su una superficie curva; il fatto che anche il rivelatore sia curvo conserva una buona qualità dell'immagine su tutto il campo visuale. Sottilissimi filtri di metallo e plastica definiscono quattro regioni spettrali abbastanza ampie, centrate a 10, 14, 20 e 60 nanometri. I filtri sono montati in un disco dotato di motore posto di fronte al rivelatore e sono alternabili a volontà. (Finora sono state eseguite quasi 100 000 commutazioni, senza problemi di sorta!) Le due regioni di lunghezza d'onda minore, 10 e 14 nanometri, sono state utilizzate per eseguire la scansione di tutto il cielo, mentre le osservazioni puntuali si possono effettuare in tutte e quattro le regioni. I filtri sono stati realizzati dal Rutherford Appleton Laboratory in collaborazione con la Lebow e la Luxel, negli Stati Uniti.

Le prestazioni della Wide Field Camera di *ROSAT* e del satellite *EUVE* sono in gran parte complementari. La prima, combinata con il telescopio per raggi X, offre una copertura simultanea dell'ultravioletto estremo e dei raggi X «molli», con moderata risoluzione spettrale. I telescopi a scansione di *EUVE* hanno ampliato la ricognizione di tutto il cielo da 20 a 60 nanometri, e gli spettrometri sono un mezzo potente per lo studio delle sorgenti più luminose. Le scansioni di tutto il cielo a lunghezza d'onda minore (10 nanometri) eseguite da *ROSAT* e da *EUVE* sono simili sia per la regione dello spettro interessata sia per la sensibilità. Una caratteristica della Wide Field Camera è l'alta sensibilità a 14 nanometri: diversamente da *EUVE*, essa ha rilevato la maggior parte delle sorgenti a due diverse lunghezze d'onda. Questo permette di misurare il «colore» delle sorgenti nell'ultravioletto estremo, un'informazione importante per identificare sia il tipo di sorgente (per esempio una nana bianca calda) sia la quantità di radiazione assorbita dai gas interstellari nel tragitto dalla sorgente al telescopio.

Consideriamo ora alcuni dei principali risultati ottenuti dalla Wide Field Camera. Un primo catalogo di 383 sorgenti è stato pubblicato nel 1993. È risultato che le due classi più comuni di oggetti che emettono radiazione ultravioletta estrema sono le nane bianche calde, con circa 120 sorgenti, e le stelle a corona attiva di «tipo evoluto» (tipi spettrali F--M), con circa 180 sorgenti. Fra le altre sorgenti vi sono stelle variabili cataclismiche, galassie attive, stelle di tipo B, stelle binarie a raggi X e resti di supernova. Prima di essere inclusi nel catalogo, molti di questi oggetti erano ignoti nel visibile, o almeno le loro proprietà peculiari non erano mai state riconosciute. La Wide Field Camera ha fornito le prime misurazioni nell'ultravioletto estremo di oggetti esterni alla nostra galassia (galassie attive) e le prime mappe a queste lunghezze d'onda di resti di supernova (quelli della Vela e del Cigno). L'elevata luminosità nell'ultravioletto estremo delle otto nuove variabili cataclismiche fa pensare che gran parte della loro energia possa essere prodotta con meccanismi diversi da quelli operanti in altre stelle note di questo tipo, e ci dà quindi indizi preziosi sui fenomeni fisici che determinano la variabilità. Le molte stelle di tipo F-M a corona attiva individuate nella scansione di tutto il cielo offrono una fortunata opportunità per studi statistici, specie sui rapporti fra attività stellare, età e velocità di rotazione.

Dato che la radiazione ultravioletta estrema è fortemente assorbita dal gas interstellare della nostra galassia, la sua misurazione è un metodo potente per determinare la natura e la densità del mezzo interstellare. Tenendo presente che la radiazione di lunghezza d'onda maggiore è assorbi-ta più fortemente di quella di breve lunghezza d'onda, si è sfruttato il numero, il «colore» nell'ultravioletto estremo e la distribuzione spaziale delle nane bianche e delle stelle di tipo evoluto per determinare l'estensione della regione di gas a bassissima densità nella quale è situato il sistema solare.

Il sistema solare si trova in una regione di spazio (chiamata «bolla locale») dove la densità del mezzo interstellare è molto inferiore alla media. Gli astronomi dell'Università di Leicester hanno utilizzato i dati raccolti dalla Wide Field Camera di *ROSAT* per determinarne l'estensione. La loro tecnica si basa sul fatto che certe stelle, come le nane bianche, emettono intensamente radiazione ultravioletta estrema, che a sua volta è assorbita dall'idrogeno e dall'elio del mezzo interstellare. L'entità dell'assorbimento permette di dedurre la quantità di gas lungo la linea di vista; studiando molte stelle si può così ricavare la distribuzione totale del gas. I colori in questa rappresentazione di tutto il cielo indicano quanto dista il confine della regione di bassa densità: il blu corrisponde a 200 anni luce, il verde a 300 anni luce e il rosso a 400 anni luce.

Le prime teorie sulla composizione delle nane bianche calde prevedevano che la loro atmosfera, che emette radiazione ultravioletta estrema e radiazione X, fosse costituita quasi solo da idrogeno e/o elio. Molti anni prima del lancio di *ROSAT*, Stephane Vennes e altri, che si basavano sulle osservazioni eseguite dal satellite *EXOSAT* dell'ESA per l'astronomia nei raggi X, avevano però trovato che alcune di queste stelle erano molto meno luminose nell'ultravioletto estremo e nei raggi X di quanto fosse previsto per atmosfere di idrogeno/elio, e avevano proposto un ulteriore assorbimento dovuto alla presenza nell'atmosfera stellare (per un fenomeno di «levitazione radiativa») di tracce di elementi pesanti come carbonio, azoto, ossigeno e ferro.

Tuttavia si è dovuta attendere la ricognizione di tutto il cielo eseguita da *ROSAT* per stabilire la frazione del totale e il tipo delle nane bianche interessate dal fenomeno. Il numero totale delle nane bianche rilevate dalla Wide Field Camera o dal telescopio per raggi X è solo un decimo di quello atteso in base alle osservazioni nel visibile. Le misurazioni di *ROSAT* sono state utilizzate in uno studio dettagliato condotto da Martin Barstow dell'Università di Leicester con molti colleghi nel Regno Unito, in Germania e negli Stati Uniti. Essi hanno trovato che le stelle con temperatura superficiale inferiore a circa 40 000 gradi Celsius sembrano effettivamente avere un'atmosfera di idrogeno puro; nelle stelle più calde, però, deve avvenire un assorbimento da parte di elementi pesanti, forse a causa del ruolo più rilevante della levitazione radiativa. Ulteriori dati dovrebbero giungere dagli spettri ad alta risoluzione ottenuti da *EUVE*.

ROSAT ha avuto successo anche nello scoprire nane bianche «nascoste» in sistemi binari, dove la luce visibile della compagna spesso nasconde quella più debole della nana bianca. Tuttavia, alle lunghezze d'onda dell'ultravioletto estremo e dei raggi X, i ruoli sono sovente invertiti e la nana bianca si mostra con chiarezza. Grazie alle misurazioni di *ROSAT*, si stima ora che fino al 20 per cento di tutte le nane bianche si trovi in sistemi binari, un dato che ha implicazioni importanti per le teorie dell'evoluzione stellare.

Un altro risultato importante è stato ottenuto, nonostante la perdita di sensibilità della Wide Field Camera in seguito all'incidente del gennaio 1991, con l'osservazione mediante il filtro a 60 nanometri di due stelle giganti luminose di tipo B, Beta ed Epsilon Canis Majoris, che ha rivelato intensi segnali da entrambe le stelle: è la prima misurazione del «continuo di Lyman» dell'idrogeno da stelle normali, ed è importante per lo studio sia delle stelle stesse sia del mezzo interstellare.

Nell'ultimo anno i dati della scansione di tutto il cielo eseguita dalla Wide Field Camera sono stati completamente rielaborati con tecniche più perfezionate. Il risultato è un catalogo aggiornato contenente quasi 500 sorgenti ultraviolette estreme; rispetto al primo catalogo vi è un aumento di quasi il 25 per cento, e ora oltre l'80 per cento delle sorgenti è stato misurato a due lunghezze d'onda. Per quanto riguarda le prospettive future, i finanziamenti per *ROSAT* sono sufficienti a consentirgli di funzionare almeno per tutto il 1995. (*John Pye, Università di Leicester*)

de massa nella costellazione del Cane Maggiore, è di gran lunga la sorgente di radiazione ultravioletta estrema più luminosa del cielo, pur essendo lontana oltre 600 anni luce. John Vallerga e collaboratori del CEA hanno individuato questa stella nella regione a lunghezza d'onda maggiore coperta dalla ricognizione ampia, regione nella quale l'assorbimento dovuto alla materia interstellare è massimo. Questa osservazione comporta che nella direzione della stella vi siano meno di 0,002 atomi di idrogeno per centimetro cubo, un valore circa 1000 volte inferiore a quello medio per la nostra galassia.

Lo spettro ultravioletto estremo di Epsilon Canis Majoris contraddice tutto ciò che sappiamo sull'atmosfera delle stelle giovani calde. Joseph P. Cassinelli dell'Università del Wisconsin, con il suo gruppo di lavoro, ha analizzato lo spettro di questa stella nella speranza di comprendere la natura dei venti stellari che, secondo le osservazioni nei raggi X, vengono emessi dagli oggetti di questo tipo. La radiazione ultravioletta proveniente da questi venti è stata in effetti rilevata, ed è in corso di studio; molto più sorprendente è stata la scoperta che radiazione analoga viene emessa anche dalla fotosfera della stella.

Le decine di studi compiuti su Epsilon Canis Majoris nell'ultravioletto lontano, nel visibile e nell'infrarosso hanno confermato immancabilmente la validità dei modelli attuali di questa classe di stelle; il flusso ultravioletto estremo proveniente dalla fotosfera della stella supera però di 30 volte quello previsto da tutti i modelli accettati. Vari studiosi hanno avanzato ipotesi sulle cause del fenomeno, ma le loro spiegazioni sono molto diverse; occorreranno certo altri studi per chiarire questa anomalia.

Epsilon Canis Majoris ha anche consentito di comprendere meglio il fenomeno della ionizzazione del mezzo interstellare, che si verifica quando un atomo interstellare assorbe un fotone il quale libera uno degli elettroni atomici. La radiazione ultravioletta estrema di questa stella è talmente intensa da farne la fonte prevalente di ionizzazione del mezzo interstellare nel suo quadrante di cielo. Sono ora in corso studi approfonditi sulla natura del mezzo interstellare che tengono conto di questo nuovo risultato.

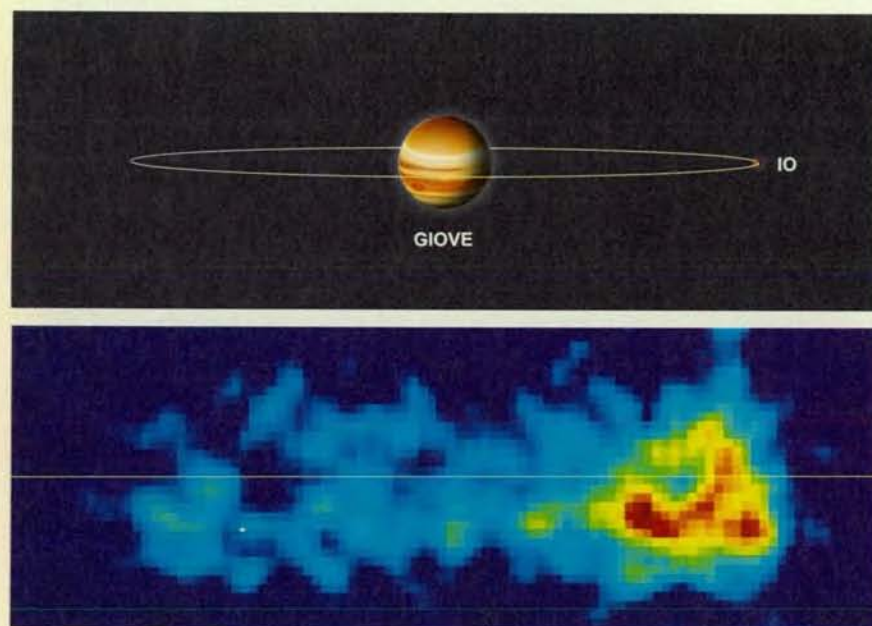
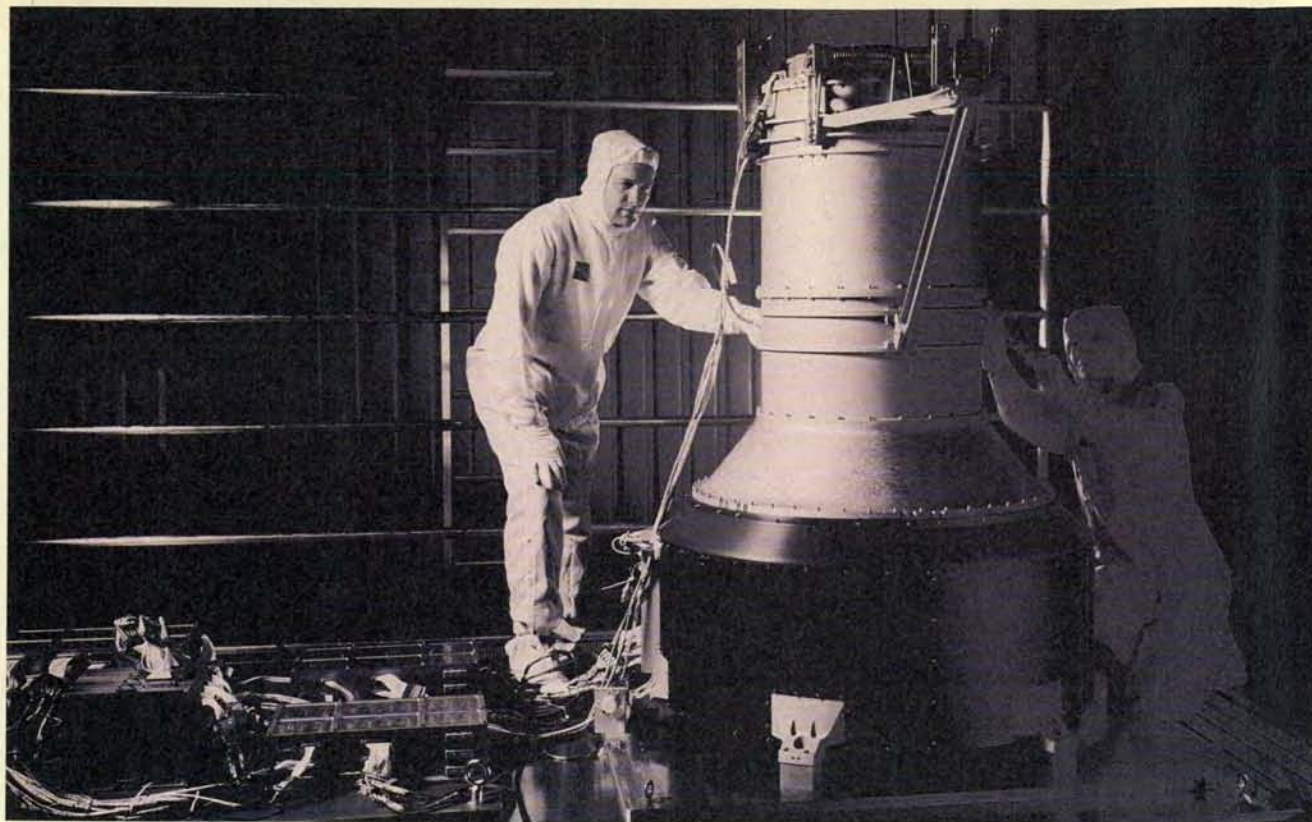
In concomitanza con la ionizzazione del mezzo interstellare, si verifica assorbimento della radiazione ultravioletta estrema. Questo assorbimento viene evidenziato nella radiazione di una sorgente astronomica per mezzo di righe scure o di un limite di assorbimento nello spettro. Studiando questi effetti, si possono dedurre la temperatura del mezzo interstellare e la densità e il grado di ionizzazione di ognuno degli elementi chimici presenti. L'idrogeno, l'elio atomico e l'elio ionizzato una volta sono i responsabili principali dell'assorbimento della radiazione ultravioletta estrema. I miei colleghi e io al CEA abbiamo studiato questo assorbimento nello spettro ultravioletto estremo di una nana bianca calda, GD 246, che si trova a circa 200 anni luce di distanza. Lungo la linea di vista in direzione della stella, gli atomi di idrogeno hanno una densità media di circa 0,04 per centimetro cubo, e circa il 25 per cento dell'elio è ionizzato.

Gli spettri continui delle nane bianche sono ideali per questi studi. Abbiamo ormai compiuto osservazioni analoghe su una decina di queste stelle, in direzioni diverse del cielo. Analizzando i risultati riusciremo a dedurre alcune caratteristiche dello stato di ionizzazione complessivo del mezzo interstellare, ottenendo informazioni essenziali per riuscire a comprendere come esso si sia evoluto. L'obiettivo finale è quello di scoprire come vi si sviluppino gli addensamenti di gas interstellare che daranno vita a nuove stelle.

In realtà anche le nane bianche calde, numericamente la seconda classe di sorgenti ultraviolette estreme, hanno fornito la loro parte di sorprese. Lo spettro ultravioletto estremo di molte di queste stelle si è rivelato assai più debole di quanto prevedesse la teoria, costringendoci a rivedere i modelli dell'atmosfera di questi oggetti. Vale la pena di spiegare brevemente perché ci si aspettava che le nane bianche dominassero il cielo nell'ultravioletto estremo, e perché questo non avvenga.

Una nana bianca concentra una massa circa pari a quella del Sole in un volume paragonabile a quello della Terra, e quindi sviluppa alla propria superficie un'attrazione gravitazionale intensissima, di norma pari a 100 000 volte quella terrestre. Per 50 anni si è ritenuto, in base a considerazioni teoriche, che in un campo gravitazionale così intenso la materia più densa sarebbe affondata verso il centro, e l'atmosfera si sarebbe quindi separata gravitativamente in strati di composizione diversa. Tutti gli elementi pesanti si sarebbero trovati al centro, e negli strati esterni sarebbe rimasto solo idrogeno quasi puro o, in sua assenza, elio quasi puro.

In teoria era logico dedurre che qualunque nana bianca con strati esterni di idrogeno o elio puro avrebbe dovuto emettere quantità davvero enormi di radiazione ultravioletta estrema, ma le osservazioni della missione Apollo-Sojuz, di *EXOSAT* (un altro satellite per raggi X con una certa sensibilità all'ultravioletto estremo) e oggi di *EUVE* hanno rivelato quantità molto modeste di questa radiazione.

Qualche tempo prima del lancio di *EUVE*, Stephane Vennes del CEA aveva già proposto una spiegazione di questa carenza, e le osservazioni spettroscopiche del satellite hanno dimostrato l'esattezza della sua teoria. La radiazione ultravioletta estrema emessa dalle regioni più interne dell'atmosfera di una nana bianca spinge ioni ferro nell'alta atmosfera: infatti il ferro assorbe i fotoni ultravioletti, la cui quantità di moto produce una pressione di radiazione diretta verso l'esterno. Gli ioni sono così trasportati fino alla superficie

Il toro di Io, un anello di gas contenente ioni ossigeno e zolfo che circonda Giove, fu osservato per la prima volta in un passaggio ravvicinato di Voyager. Il gas proviene dal satellite vulcanico Io. L'immagine di *EUVE* (*in basso*) mostra che un lato dell'anello è molto più brillante dell'altro. Questa osservazione fornisce indizi sulla struttura del campo magnetico di Giove, dato che probabilmente è quest'ultimo a riscaldare il gas.

Il telescopio per la ricognizione in profondità e gli spettrometri vengono preparati per l'installazione sul satellite *EUVE*. Il telescopio ottiene immagini del cielo con esposizione molto lunga in direzione dell'ombra della Terra. Gli spettrometri, che ricevono luce da alcune sezioni dello stesso specchio, analizzano la radiazione captata nelle diverse lunghezze d'onda componenti.

della stella e con questo meccanismo possono ridurre notevolmente la quantità di radiazione ultravioletta estrema emessa dalla nana bianca.

I dati raccolti dal telescopio per ricognizione in profondità hanno fornito informazioni sulla radiazione di fondo diffusa ad alta energia che, a quanto si ritiene, proverrebbe dalla materia calda del mezzo interstellare. L'origine e le caratteristiche di questa materia calda, come pure le ragioni della sua stabilità, sono tutt'altro che chiare. Un gruppo di lavoro del CEA ha scoperto nel fondo diffuso un'«ombra» provocata da una nube che, per quanto molto rarefatta, assorbe tutta la radiazione ultravioletta estrema proveniente da sorgenti più lontane.

La radiazione ultravioletta estrema che rileviamo in questa direzione proviene interamente dalla regione ben definita compresa fra la Terra e la nube. Abbiamo ottenuto la collaborazione di Jens Knude, dell'Osservatorio dell'Università di Copenaghen, il quale ha determinato che la distanza della nube è di 120 anni luce. Grazie a questa informazione siamo riusciti a calcolare direttamente la pressione del mezzo interstellare caldo, che è risultata sorprendentemente elevata rispetto alle precedenti valutazioni ottenute per via indiretta, comprese tra 700 e 6000 kelvin per centimetro cubo; il valore da noi calcolato è di 19 000 kelvin per centimetro cubo. (Si tratta comunque di una pressione estremamente bassa, pari a circa un miliardesimo di miliardesimo della pressione atmosferica a livello del mare.)

Anche nel campo ormai ben studiato della fisica planetaria *EUVE* ha cominciato a dare contributi ragguardevoli. Un gruppo di astronomi sotto la guida di H. Warren Moos e Doyle T. Hall della Johns Hopkins University ha ottenuto immagini straordinarie del toro di plasma che circonda Giove (*si veda l'illustrazione a pagina 38*). I passaggi ravvicinati di Voyager nel 1979 rivelarono che la struttura è costituita prevalentemente da ioni ossigeno e zolfo emessi dal satellite vulcanico Io. Le immagini nell'ultravioletto estremo indicano che un lato del toro è più brillante dell'altro, il che significa che il gas di quel lato si trova in un ambiente più caldo e più denso. Dato che la compressione e il riscaldamento sono, molto probabilmente, prodotti dal moto del gas all'interno del campo magnetico gioviano, le osservazioni di questo toro forniscono indizi preziosi sulla struttura interna della magnetosfera del pianeta più grande del sistema solare.

La fase di osservazioni spettroscopiche da parte di ricercatori ospiti con il satellite *EUVE* continuerà per tutto il 1995. Non possiamo sapere quali scoperte ci attendono, ma quelle compiute finora sono sicuramente incoraggianti. Dopodiché i progressi dell'astronomia nell'ultravioletto estremo dipenderanno in gran parte dal supporto che la NASA vorrà fornirle. Il satellite rimarrà in orbita almeno fino al 1999: se verrà autorizzato il proseguimento delle osservazioni, entreremo nel nuovo millennio con il nostro primo osservatorio orbitante per l'ultravioletto estremo ancora impegnato nell'inviare a terra flussi incessanti di nuovi dati.

BIBLIOGRAFIA

HETTRICK MICHAEL C. e BOWYER STUART, *Variable Line-Space Gratings: New Designs for Use in Grazing Incidence Spectrometers* in «Applied Optics», 22, n. 24, 15 dicembre 1983.

Extreme Ultraviolet Explorer Mission, numero speciale di «Journal of the British Interplanetary Association», 46, n. 9, settembre 1993.

BOWYER STUART, *Astronomy and the Extreme Ultraviolet Explorer Satellite* in «Science», 263, pp. 55-59, 7 gennaio 1994.

Come le cellule elaborano gli antigeni

Le cellule del sistema immunitario attivano le difese dell'organismo esponendo in superficie complessi molecolari costruiti a partire da frammenti proteici propri e appartenenti ad agenti patogeni estranei

di Victor H. Engelhard

Tutti gli organismi pluricellulari possiedono almeno un primitivo sistema di difesa che distingue gli agenti patogeni estranei dai componenti dell'organismo e li elimina. Oltre a ciò, i vertebrati superiori hanno evoluto un sistema immunitario più avanzato che è in grado di distinguere gli agenti patogeni e di scegliere risposte appropriate a ciascuno di essi. Il vantaggio di questa immunità specifica è che il sistema immunitario può adattarsi rapidamente agli agenti infettivi che incontra con maggiore frequenza.

In un vertebrato, la sorveglianza condotta dal sistema immunitario a livello biomolecolare si basa sulla ricerca degli antigeni - molecole bersaglio immunologiche - che segnalano la presenza di un invasore. Gli antigeni non sono semplicemente parti di un agente patogeno, ma sono spesso molecole costruite dalle cellule dell'ospite a partire da frammenti delle proteine dell'invasore e da proteine cellulari facenti parte del maggior complesso di istocompatibilità (MHC). L'elaborazione e il montaggio degli antigeni sono la chiave della flessibilità, della specificità e della vastità di azione del sistema immunitario.

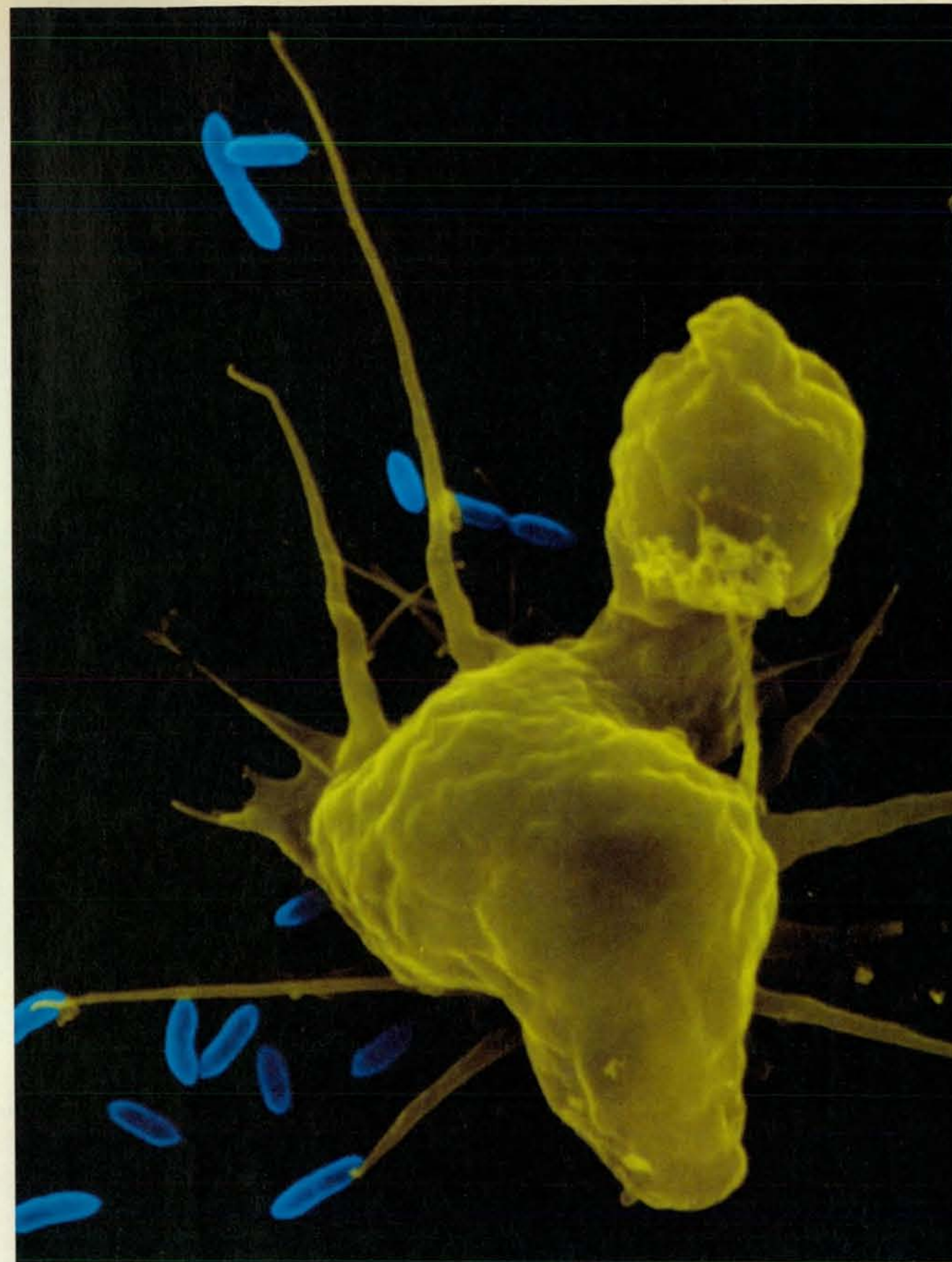
La «costruzione» degli antigeni e la loro presentazione sulla superficie cellulare, dove il sistema immunitario può esaminarli, sono fenomeni complessi, di cui si conoscono già in dettaglio molte fasi. È interessante notare come l'elaborazione degli antigeni sia strettamente legata ai meccanismi che sintetizzano e riciclano tutte le proteine all'interno delle cellule e le trasportano da un comparto intracellulare all'altro. Una conoscenza più approfondita dell'elaborazione degli antigeni potrà quindi chiarire ciò che succede a livello molecolare non solo all'interno delle cellule malate, ma anche di quelle sane, e contribuire alla messa a punto di migliori terapie per un gran numero di patologie, dalle infezioni al cancro.

Prima di illustrare i meccanismi attraverso cui vengono elaborati gli antigeni, può essere utile riepilogare alcuni aspetti del funzionamento del sistema immunitario. Per produrre risposte specifiche, il sistema immunitario impiega un'ampia popolazione di globuli bianchi del sangue, i linfociti. Questi possiedono sulla loro superficie recettori che si legano con elevata affinità agli antigeni. Ciascun linfocita esprime recettori di struttura leggermente diversa, e di conseguenza è specifico per un ben determinato tipo di antigene. Gli immunologi stimano che in un essere umano la popolazione di linfociti esprima più di 100 milioni di recettori distinti per gli antigeni. Questo repertorio permette al sistema immunitario di reagire con estrema specificità a quasi tutti gli antigeni estranei.

Il sistema immunitario regola la qualità della propria risposta in base alla natura dell'agente patogeno e al modo in cui esso invade l'organismo. Molti batteri e grandi parassiti come i vermi provocano infezioni negli spazi extracellulari dell'organismo, quali il circolo sanguigno o il lume intestinale. Per controllare questi agenti patogeni, il sistema immunitario dispiega recettori per gli antigeni solubili, chiamati anticorpi, che sono prodotti dai linfociti *B*. Gli anticorpi si legano direttamente a un parassita e forniscono un bersaglio per l'azione distruttiva di altre molecole e cellule immunitarie.

I virus e molti altri batteri e protozoi, come quelli che causano la malaria, la malattia del sonno e la leishmaniosi, sono più difficili da combattere in quanto provocano infezioni nelle cellule dell'ospite, dove gli anticorpi non li possono raggiungere. Per combattere questi organismi, deve entrare in azione un altro schieramento del sistema immunitario. Tutte le cellule dell'ospite portano molecole MHC in superficie. Nelle cellule infettate, le molecole MHC si legano a piccoli peptidi, o frammenti di proteine, che provengono dal parassita, e li espongono alla superficie cellulare. I complessi di peptidi del parassita e molecole MHC dell'ospite formano gli antigeni che possono essere riconosciuti dai recettori presenti sui linfociti *T* citotossici (*killer*). I linfociti *T* possono così identificare e distruggere selettivamente le cellule infettate, risparmiando quelle sane. Una funzione dei complessi peptide-MHC è dunque quella di segnalare che la cellula è infettata.

I complessi peptide-MHC sono importanti anche nella regolazione della risposta immunitaria. Cellule specializzate, come i macrofagi, percorrono l'organismo ingerendo i materiali extracellulari che incontrano, degradandoli per produrre peptidi e presentando questi ultimi come antigeni. Le cellule che espongono gli antigeni si spostano dai siti di infezione ai linfonodi, dove reclutano linfociti per la risposta immunitaria; in effetti le cellule che presentano gli antigeni sono come messaggeri provenienti dalla prima linea di una battaglia. Quando i linfociti *T helper* riconoscono un complesso peptide-MHC su queste cellule, secernono molecole simili a ormoni (le linfochine) che promuovono il differenziamento delle cellule del sistema immunitario.

Così, il riconoscimento di un complesso peptide-MHC sulla superficie di una cellula è un evento fondamentale nell'attivazione di tutte le risposte immunitarie e, in particolare, nell'eliminazione dei parassiti intracellulari. Negli ultimi 20 anni, immunologi di tutto il mondo hanno cercato di scoprire come si forma il complesso fra una molecola

Un macrofago ingerisce batteri nel corso della risposta immunitaria a un'infezione. All'interno di questi globuli bianchi del sangue le proteine batteriche vengono degradate a peptidi e presentate come antigeni da molecole specializzate che si trovano sulla superficie cellulare. Negli ultimi decenni sono stati gradualmente compiuti molti passi avanti nella comprensione dei processi attraverso i quali le cellule trasformano in antigeni sia le proteine proprie sia quelle estranee.

Il riconoscimento degli antigeni regola la risposta immunitaria. Quando i linfociti *T helper* riconoscono un complesso antigenico su una cellula specializzata nel presentare l'antigene, come un macrofago, liberano molecole che fungono da segnale, le linfochine. Esse inducono i linfociti *B* a produrre anticorpi contro i batteri extracellulari (*a sinistra*) o i linfociti *T* citotossici ad attaccare le cellule infettate (*a destra*). I complessi antigenici consentono anche ai linfociti *T* citotossici di identificare i bersagli.

MHC e un peptide. Questi studi hanno chiarito come la struttura delle molecole MHC permetta loro di legarsi a molti peptidi diversi della gamma quasi infinita di agenti infettivi che l'organismo può incontrare.

Le molecole MHC vennero scoperte da studiosi che lavoravano sul trapianto di tessuti. Negli anni trenta George D. Snell dei Jackson Laboratories di Bar Harbor e Peter A. Gorer del Lister Institute of Preventive Medicine in Inghilterra descrissero un locus, o posizione genica, sul cromosoma 17 del topo, che era il fattore primario nel determinare se tessuti trapiantati da un ceppo di topo a un altro sarebbero stati accettati o rigettati. Essi denominarono questo locus *H-2*. (La *H* sta per «istocompatibilità» in inglese.) Un locus analogo nell'uomo venne definito negli anni cinquanta da Jean Dausset dell'Università di Parigi.

Ulteriori ricerche dimostrarono che *H-2* conteneva molti geni che codificano per antigeni di trapianto, ossia proteine che sono espresse alla superficie delle cellule e possono essere riconosciute dal sistema immunitario. Il termine «maggior complesso di istocompatibilità» venne coniato per riflettere l'importanza di questo gruppo di geni strettamente correlati nel rigetto o nell'accettazione di un trapianto. (Storicamente le versioni umane di queste molecole sono spesso state chiamate HLA, da *human leukocyte antigen*, ma il termine MHC è ora generalmente accettato.)

Studi strutturali hanno accertato che gli antigeni di trapianto codificati dai geni MHC appartengono a due tipi fondamentali, denominati classe I e classe II. Ciascuna classe dell'MHC è altamente diversificata: le popolazioni umane e murine contengono più di 100 forme di queste molecole, sebbene un singolo individuo ne esprima generalmente da tre a sei per ciascuna classe.

La funzione fisiologica delle molecole MHC divenne chiara alla fine degli anni sessanta. Lavorando indipendentemente, Baruj Benacerraf della New York University e Hugh O. McDevitt (prima in Israele e poi alla Harvard University) trovarono che certi esemplari di cavia e di topo potevano sintetizzare anticorpi contro alcuni semplici antigeni proteici, mentre altri non erano in grado di farlo. Impiegando molti ceppi di topi incrociati tra loro, McDevitt dimostrò che la «responsività» e la «non responsività» erano tratti geneticamente determinati che dipendevano dal particolare tipo di molecole MHC di classe II espresse dai topi in questione.

Analogamente, nel 1974, Rolf Zinkernagel e Peter Doherty della John Curtin School of Medical Research di Canberra scoprirono che i topi di certi ceppi inincrociati morivano in seguito a infezione cerebrale con virus della coriomeningite linfocitaria, mentre altri sopravvivevano. Le vittime producevano in risposta al virus linfociti *T* citotossici che attaccavano il sistema nervoso infettato. (I linfociti *T* hanno di norma un effetto protettivo sull'organismo, ma in questo caso erano coinvolti in una reazione autoimmunitaria mortale.) Come dimostrarono i due studiosi, la capacità di produrre questi linfociti *T* era legata all'espressione di un particolare gruppo di molecole MHC di classe I.

Zinkernagel e Doherty fecero poi un passo avanti fondamentale dimostrando che i linfociti *T* isolati da un topo potevano riconoscere le cellule infettate da virus di un secondo animale; questo accadeva però solo se entrambi gli animali esprimevano le stesse molecole di classe I. In breve, la reazione immunitaria poteva avvenire solo se erano presenti sia il giusto antigene sia la giusta molecola MHC. La necessità della simultanea presenza di un antigene estraneo e di una molecola MHC appropriata fu denominata riconoscimento dell'antigene controllato dall'MHC.

Vari gruppi, in particolare quelli di Alan S. Rosenthal dei National Institutes of Health e di David H. Katz di Harvard, dimostrarono che il riconoscimento dell'antigene controllato dall'MHC poteva spiegare anche le osservazioni di McDevitt sulla responsività immunitaria. I linfociti *B* non producevano anticorpi contro i semplici antigeni proteici di McDevitt, a meno che non fossero stimolati dai linfociti *T* helper. Questi ultimi riconoscevano solo le cellule presentanti l'antigene che erano state esposte all'antigene proteico e avevano appropriate molecole MHC di classe II.

Nei 10 anni successivi molti gruppi di ricerca tentarono di comprendere come i linfociti *T* riconoscessero sia l'antigene sia le molecole MHC. Studi separati condotti nei laboratori di Emil R. Unanue, prima a Harvard e poi alla Washington University, e di Howard M. Grey del National Jewish Center for Immunology and Respiratory Medicine di Denver aprirono la strada a ulteriori, fruttuose scoperte. Essi trovarono che, per stimolare una risposta immunitaria, le proteine extracellulari devono prima essere inglobate per endocitosi e spezzate in peptidi da una cellula presentante l'antigene. I peptidi si legano poi a molecole MHC di classe II che appaiono sulla superficie cellulare come complesso che può essere riconosciuto dai linfociti *T* helper. Questa sequenza di eventi - l'ingestione dell'antigene, la sua frammentazione in peptidi e il legame di questi con le molecole MHC - è chiamata elaborazione dell'antigene.

Anche le molecole MHC di classe I partecipano all'elaborazione dell'antigene. Come è stato scoperto da Alain R. M. Townsend del John Radcliffe Hospital di Oxford, i linfociti *T* citotossici identificano le cellule infettate da virus cercando peptidi virali presentati da una molecola MHC di classe I. Ulteriori ricerche svolte nei laboratori di Thomas J. Braciale della Washington University e Michael J. Bevan dello Scripps Research Institute hanno determinato che tutti i peptidi presentati naturalmente da molecole MHC di classe I derivano da proteine del citoplasma cellulare.

Tutti questi risultati indicano che i due tipi di molecole MHC esaminano antigeni che vengono elaborati in comparti intracellulari diversi. Si è visto invariabilmente che i peptidi associati a molecole MHC di classe I derivano dalle proteine della cellula stessa. Le proteine che danno origine ai peptidi associati alle molecole MHC di classe II provengono a volte dal mezzo dove crescono le cellule, ma più spesso da proteine situate sulla membrana esterna.

Un'implicazione importante di queste osservazioni è che gran parte delle molecole MHC che si trovano su una cellula presenta peptidi derivanti da proteine cellulari normali e non da agenti patogeni. Anche quando la cellula ha ingerito un antigene estraneo o è stata infettata, il numero di molecole MHC che presentano peptidi estranei è solo una piccola frazione del totale.

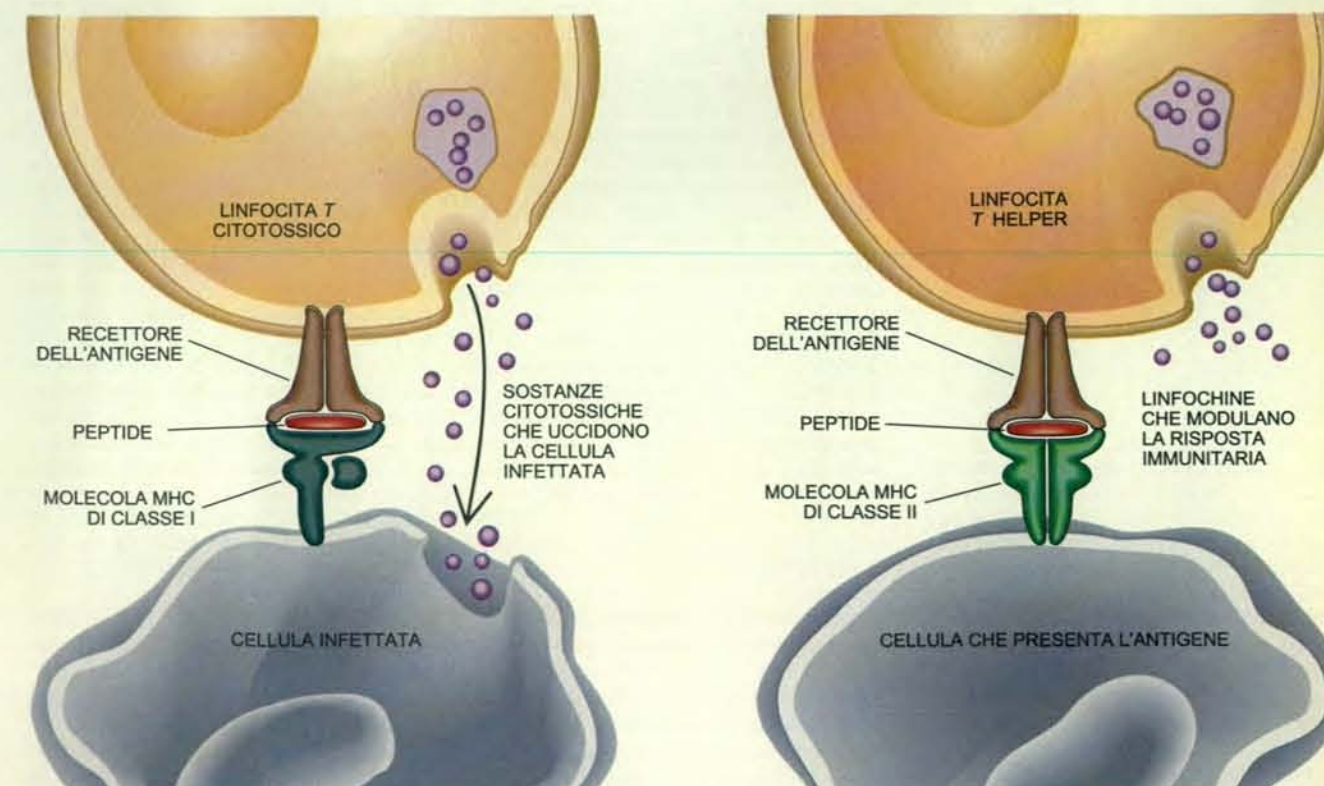
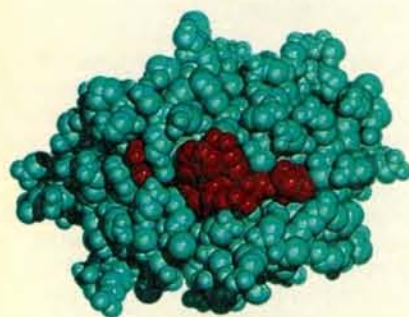
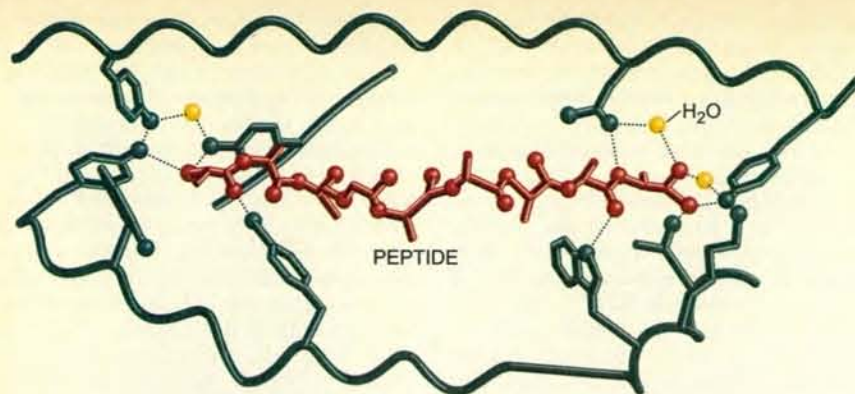
La capacità delle molecole MHC di legarsi a peptidi specifici e di partecipare all'elaborazione degli antigeni è una conseguenza della loro struttura e della loro sintesi. Entrambe le classi di molecole MHC sono composte da due subunità proteiche. Le molecole di classe I consistono di una catena proteica pesante e di una catena leggera molto più piccola, chiamata β2m. Le due catene delle molecole di classe II sono più o meno delle stesse dimensioni e più piccole della catena pesante della classe I.

Nonostante queste differenze, le analisi cristallografiche a raggi X eseguite da Don C. Wiley di Harvard e colleghi hanno rivelato che le molecole MHC di classe I e II hanno struttura sorprendentemente simile. Entrambi i tipi presentano un profondo incavo nella superficie superiore, dove si legano i peptidi. La struttura dell'incavo è complessa e contiene diverse tasche che possono interagire con parti diverse del peptide. Le differenze nella forma e nelle proprietà di queste tasche conferiscono ai vari tipi di molecole MHC la loro affinità selettiva per certi peptidi.

Tuttavia si sta ancora cercando di capire più esattamente che cosa determini queste affinità. Gli studi cristallografici hanno fornito qualche indizio sul legame fra i peptidi e le molecole MHC. Seguendo una via alternativa, si sono cercate anche caratteristiche comuni a tutti i peptidi che si legano a una certa forma di molecola MHC, ma la complessità strutturale dei peptidi rende difficile questo lavoro.

La spettrometria di massa in tandem si è per fortuna rivelata assai utile. Con questa tecnica i peptidi vengono staccati dalle molecole MHC in ambiente acido, purificati e poi fatti passare attraverso uno spettrometro di massa, che può essere utilizzato per determinare le sequenze amminoacidiche costituenti ogni peptide. Robert A. Henderson, Eric L. Huczko e Ye Chen del mio laboratorio e Andrea L. Cox, Hanspeter Michel, Wanda M. Bodnar, Theresa A. Davis e Jeffrey Shabanowitz del laboratorio di Donald F. Hunt presso l'Università della Virginia si sono serviti di questa tecnica per analizzare la struttura di peptidi associati a diverse molecole MHC di classe I dell'uomo. Questi studi hanno confermato che le molecole MHC sono in grado di legarsi a un insieme di peptidi eccezionalmente diversificato. Una cellula umana possiede da mezzo milione a un milione di molecole di classe I di un singolo tipo; stimiamo che in ogni momento queste molecole presentino oltre 10 000 peptidi diversi, e forse addirittura 100 000.

Noi e altri abbiamo scoperto che la maggior parte dei peptidi associati a una particolare forma di molecola di classe I ha in comune alcuni motivi, o caratteristiche, strutturali semplici che permettono il legame. I peptidi che si legano alle molecole MHC di classe I hanno di solito una lunghezza di otto o nove residui amminoacidici. Sembra che questa sia la lunghezza ottimale per consentire alle due estremità del peptide - la terminazione amminica e quella carbossilica - di inserirsi in tasche situate alle estremità opposte dell'incavo di legame della molecola MHC.

Gli amminoacidi in certe posizioni

I complessi antigenici formati da molecole del maggior complesso di istocompatibilità (MHC) e da peptidi possono essere riconosciuti dai linfociti *T*. Le molecole MHC di classe I, che si trovano su tutte le cellule a corpo nucleato, sono in grado di presentare peptidi virali. I linfociti *T* reagiscono a questi complessi uccidendo la cellula infettata (*a sinistra*). Le molecole MHC di classe II, che si trovano solo sulle cellule specializzate nella presentazione dell'antigene, espongono peptidi ricavati dalla degradazione di proteine extracellulari. Questi complessi provocano la liberazione di linfochine (*a destra*).

Le molecole MHC di classe I sono costituite da una subunità pesante e da una subunità β2m più leggera (*in basso*). Nella vista dall'alto un incavo alla sommità della molecola trattiene un peptide, generalmente lungo circa nove residui amminoacidici (*al centro*). Le estremità del peptide sono mantenute al loro posto da legami (*linee tratteggiate*) che si formano all'interno di apposite tasche alle estremità dell'incavo (*in alto*).

dei peptidi sono anche altamente conservati; per esempio, la maggior parte dei peptidi che si lega alla molecola MHC di classe I umana HLA-A2.1 ha un residuo di leucina nella seconda posizione a partire dalla terminazione amminica; all'estremità carbossilica della molecola l'ultimo amminoacido è sempre idrofobo e privo di carica. Al contrario, i peptidi che si legano alla molecola MHC di classe I umana HLA-B27 hanno un residuo di arginina in seconda posizione e terminano con un residuo carico positivamente e idrofilo.

Queste informazioni e altri dati strutturali hanno composto un quadro molto semplice di come i peptidi si leghino alle molecole MHC di classe I. Le due estremità del peptide e due o tre ulteriori residui amminoacidici si inseriscono in tasche ben separate nell'incavo di legame della molecola MHC. Queste interazioni forniscono la maggior parte dell'energia di legame. Il resto della catena peptidica si estende al di sopra della superficie dell'incavo e non è fermamente vincolato da interazioni con la molecola MHC, il che implica che quest'ultima può ospitare un'enorme varietà di strutture peptidiche. Molti peptidi derivati da proteine di agenti patogeni hanno motivi strutturali che permettono loro, in appropriate circostanze, di legarsi a una molecola MHC. In effetti, sfruttando queste informazioni si è riusciti in alcuni casi a prevedere quale peptide venga presentato da una molecola MHC su una cellula infettata.

Il sito di legame con il peptide delle molecole MHC di classe II è simile a quello delle molecole di classe I, ma vi sono differenze significative. La più importante è che l'incavo di legame delle molecole di classe II non ha tasche dove si possano inserire specificamente le estremità del peptide. L'interazione di legame ha luogo principalmente nel centro dell'incavo, ossia coinvolge la parte mediana del peptide legato. I peptidi associati a molecole di classe II possono perciò variare di più in lunghezza, e in media sono considerevolmente più lunghi di quelli che si associano a molecole di classe I. Molti peptidi che si legano con una data forma di molecola di classe II costituiscono un gruppo «annidato»: hanno in comune una sequenza centrale di amminoacidi (quelli che si legano all'incavo della molecola MHC) e differiscono solo nella lunghezza delle terminazioni amminica e carbossilica.

L'incavo di legame delle molecole di classe II contiene tasche collocate più centralmente rispetto a quelle delle molecole di classe I, ma finora si sa ben poco su come queste strutture pongano vincoli al tipo di amminoacidi che il peptide deve avere. Pertanto solo ora si cominciano a definire i motivi strutturali che permetterebbero di prevedere con sicurezza quali peptidi possano legarsi a una molecola MHC di classe II.

L'associazione con i peptidi è un passo normale nella biosintesi e nell'assemblaggio di entrambe le classi di molecole MHC; ma proprio come differiscono le fonti dei peptidi associati a ciascuna classe, così sono diversi anche i meccanismi di assemblaggio.

Dopo la sintesi della catena pesante e della catena leggera β2m che compongono le molecole di classe I, le due subunità si uniscono all'interno di un organello membranoso, il reticolo endoplasmatico. Se β2m non è presente, la catena pesante non può avvolgersi nella conformazione esatta. Non può allora attraversare un altro organello, l'apparato di Golgi, ed essere avviata alla sua destinazione finale sulla superficie cellulare. Come hanno rivelato ricerche recenti, il complesso catena pesante-β2m, per completare il suo viaggio, deve anche legarsi a un peptide mentre si trova nel reticolo endoplasmatico.

Townsend e Klaus Kärre del Karolinska Institut di Stoccolma hanno dimostrato questo fatto con grande eleganza. Essi hanno identificato cellule mutanti che portavano in superficie solo il 5 per cento del numero standard di molecole MHC di classe I, anche se sintetizzavano quantità normali di catene pesanti e di catene leggere β2m. Le catene però non erano avvolte e rimanevano intrappolate nel reticolo endoplasmatico. Quando Townsend e Kärre aggiunsero i peptidi appropriati a queste cellule, le catene si avvolsero correttamente, e le cellule riuscirono a esprimere livelli quasi normali di molecole di classe I. Così, i peptidi stabilizzano le interazioni delle catene pesante e leggera, agendo per molti versi come una terza subunità della molecola di classe I.

L'identificazione di cellule mutanti, come quelle studiate da Townsend e Kärre, in cui i peptidi non riescono ad associarsi a molecole MHC di classe I ha spinto diversi gruppi di ricerca a indagare il difetto. Alla fine del 1990 quattro gruppi hanno identificato simultaneamente due geni dell'MHC che codificano per proteine di trasporto. Queste proteine sono membri di un'ampia famiglia di molecole simili che favoriscono il trasporto di piccole molecole attraverso la membrana cellulare di vari organismi. Gli scopritori hanno ipotizzato che le nuove proteine associate all'MHC trasportino peptidi dal citoplasma al reticolo endoplasmatico e le hanno battezzate TAP (trasportatori associati all'elaborazione degli antigeni).

Studi successivi hanno rivelato che tutte le linee note di cellule mutanti che presentano questo tipo di elaborazione imperfetta degli antigeni hanno difetti nell'uno o nell'altro dei geni *TAP*. Numerosi esperimenti hanno dato conferma a questa ipotesi, compresa una dimostrazione diretta del fatto che vescicole di membrana contenenti TAP catalizzano il trasporto di piccoli peptidi.

Come vengono prodotti i peptidi trasportati dalle TAP? Non si ha ancora una risposta definitiva, ma è estremamente probabile che sia coinvolto un complesso enzimatico chiamato proteasoma. I proteasomi sono grandi strutture cilindriche che si trovano in molti comparti della cellula. Sono un insieme di molte differenti proteasi (enzimi che tagliano le proteine) e sembrano essere il principale meccanismo cellulare per degradare proteine che hanno cessato di essere utili, sono state danneggiate o si sono avvolte in modo non corretto.

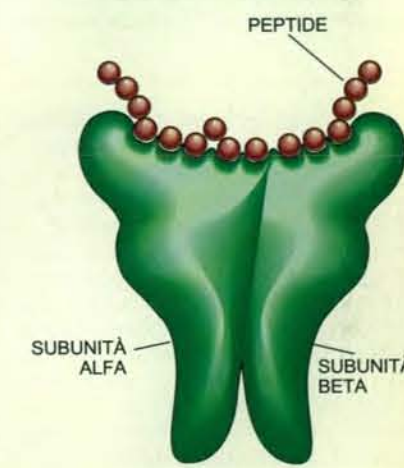
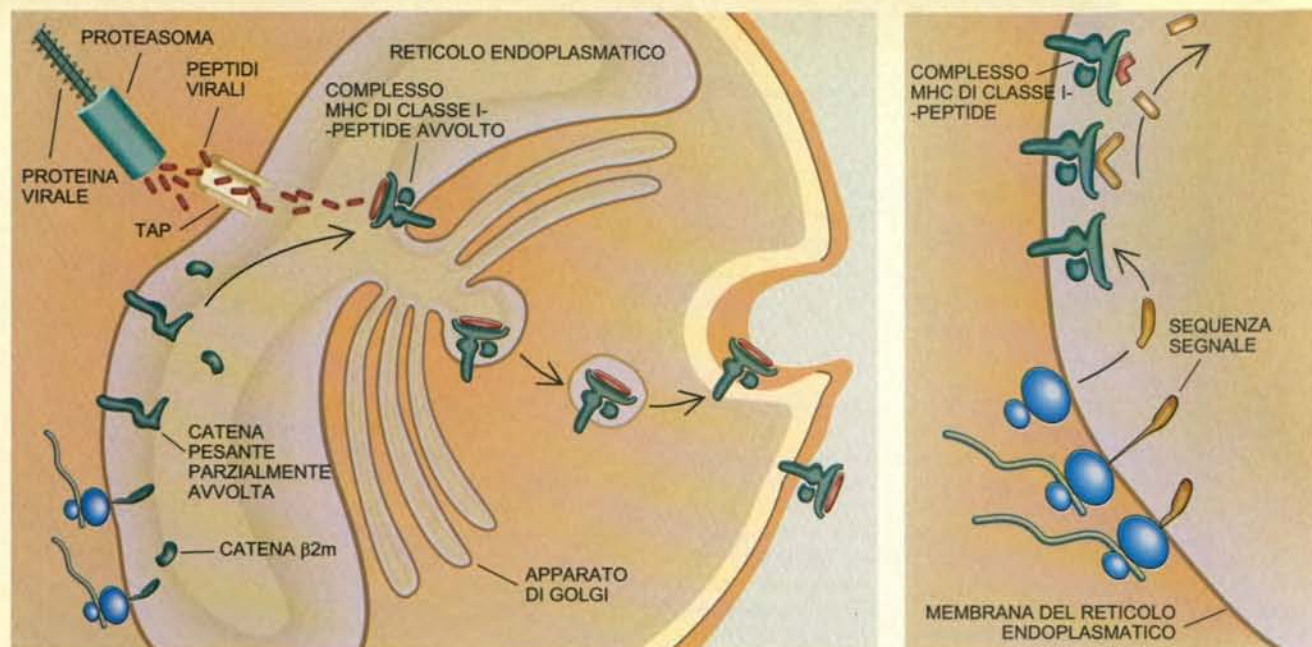
John J. Monaco del Medical College of Virginia ha eseguito alcuni degli studi più interessanti sui proteasomi dimostrando che due subunità che talvolta si trovano su di essi sono specificate da geni dell'MHC che si trovano immediatamente adiacenti a quelli per le TAP. Di norma, solo il 10 per cento circa dei proteasomi di una cellula contiene queste subunità, ma se la cellula è esposta all'interferone gamma (una linfochina liberata durante la risposta immunitaria) l'espressione di queste subunità aumenta ed esse appaiono associate a un numero maggiore di proteasomi. (Anche l'espressione di molecole MHC e di TAP da parte della cellula aumenta.)

Kenneth L. Rock e Alfred L. Goldberg di Harvard hanno di recente dimostrato che l'inclusione di queste subunità in un proteasoma fa sì che esso produca peptidi che terminano con amminoacidi basici o idrofobi, ossia proprio del tipo a cui si lega gran parte delle molecole di classe I. Non si sa se le due subunità alterino anche la lunghezza dei peptidi prodotti in modo che si conformi a quella ottimale per le molecole di classe I. Tuttavia vi sono buone ragioni per ritenere che le proteine prodotte nel citoplasma siano degradate dai proteasomi e trasportate dalle TAP nel reticolo endoplasmatico, dove possono legarsi alle molecole MHC di classe I.

Una osservazione strana, però, è che molte cellule mutanti prive di una o di entrambe le componenti delle TAP esprimono ugualmente alla loro superficie livelli abbastanza elevati di qualche forma di molecole MHC di classe I. Henderson e Michel hanno cercato entrambi di scoprire come questo avvenga e hanno trovato che su queste cellule i peptidi associati alle molecole di classe I sembrano provenire tutti dalle sequenze segnale delle proteine cellulari. Le sequenze segnale sono strutture che si trovano comunemente alla terminazione amminica di proteine appena sintetizzate che si stanno dirigendo verso la superficie cellulare o un comparto interno della cellula. Quando i ribosomi sintetizzano queste proteine, le sequenze segnale fanno sì che essi si fissino al reticolo endoplasmatico prima che la proteina sia completata. In effetti queste sequenze aiutano a dirigere le nuove proteine lungo il cammino verso la loro destinazione.

Quando la proteina si trasferisce nel reticolo endoplasmatico, un enzima taglia la sequenza segnale dalla sua estremità anteriore. Una volta liberate, le sequenze segnale nel reticolo endoplasmatico costituiscono una ricca fonte di peptidi che possono associarsi alle molecole MHC di classe I, compensando così la difettosa elaborazione degli antigeni da parte della cellula mutante. Si è scoperto che almeno due peptidi riconosciuti dai linfociti *T* derivano da sequenze segnale, il che indica che questa via alternativa di elaborazione degli antigeni può avere grande importanza.

Le molecole MHC di classe II hanno subunità alfa e beta quasi uguali per dimensioni (*in basso*). Anche queste molecole trattengono i peptidi in un incavo (*al centro*), ma in questo caso i peptidi sono fissati soprattutto da legami che si formano al centro dell'incavo (*in alto*). I peptidi legati alle molecole di classe II sono quindi in genere più lunghi, e di lunghezza più variabile, rispetto a quelli associati alle molecole di classe I.

Considerando che le molecole MHC di entrambe le classi si assemblano nel reticolo endoplasmatico, è sorprendente che non si leghino agli stessi peptidi. La spiegazione può essere, in parte, trovata nel fatto che i peptidi trasportati nel reticolo endoplasmatico dalle TAP non hanno caratteristiche strutturali che consentano un legame stabile con le molecole MHC di classe II. Una spiegazione più convincente può essere però questa: immediatamente dopo la loro sintesi le subunità di classe II si associano a una terza molecola, chiamata catena invariante o Ii. La catena invariante impedisce ai peptidi di legarsi alle molecole di classe II, o interferendo direttamente col legame o mantenendo le molecole stesse in uno stato non del tutto avvolto. Essa avvia anche le molecole MHC di classe II verso la superficie cellulare lungo un percorso che le molecole di classe I e la maggior parte delle altre proteine di membrana non seguono, facendole passare nell'apparato di Golgi e negli endosomi. Questi ultimi sono vescicole formate da invaginazioni della membrana cellulare e contengono spesso proteine di superficie e i leganti loro associati. Quando gli endosomi entrano nella cellula, il loro interno diviene acido, ed essi accumulano proteasi che degradano molte delle proteine di superficie inglobate e dei loro leganti. Infine gli endosomi tornano alla membrana, si fondono con essa e restituiscono il contenuto alla superficie.

La via di interazione con gli antigeni delle molecole di classe I (*a sinistra*) comincia quando proteine intracellulari, come quelle di un virus, vengono ridotte a peptidi dai proteasomi. I peptidi sono poi avviati da una proteina trasportatrice, la TAP, nel reticolo endoplasmatico, dove si associano alle subunità parzialmente avvolte delle molecole di classe I in un complesso MHC-peptide avvolto. Il complesso attraversa l'apparato di Golgi ed è trasportato alla superficie cellulare. In una variante di questa via scoperta dall'autore e dai suoi colleghi (*a destra*), i peptidi possono formarsi dalle sequenze segnale che vengono tagliate dall'estremità iniziale di proteine cellulari in fase di assemblaggio nel reticolo endoplasmatico.

Peter Cresswell della Duke University ha scoperto che, quando i complessi formati da molecole di classe II-Ii entrano negli endosomi, il movimento delle vescicole verso la superficie si blocca anche per sei ore. Durante questo intervallo, le proteasi endosomali digeriscono la catena invariante, il che consente alle molecole di classe II di legarsi ad altri peptidi della vescicola, molti dei quali derivano naturalmente da fonti extracellulari. Infine i complessi molecola di classe II-peptide raggiungono la superficie cellulare.

Un altro aspetto interessante della formazione dei complessi molecola di classe II-peptide è stato scoperto osservando cellule mutanti create da Elizabeth D. Mullins e Donald A. Pious dell'Università di Washington. Le molecole di classe II alla superficie di queste cellule hanno una forma stranamente floscia e facilmente denaturabile; per aspetto e comportamento, esse assomigliano alle molecole di classe II appena sintetizzate nel reticolo endoplasmatico. Si potrebbe allora supporre che queste molecole di superficie flosce siano prive anch'esse di un peptide stabilizzante, ma il loro isolamento diretto da cellule mutanti ha dimostrato che non è così: le molecole flosce sono legate a un gruppo di peptidi che derivano da una piccola regione della catena invariante e sono chiamati CLIP (da *class II-associated invariant chain peptides,* ossia peptidi della catena invariante associati a molecole di classe II).

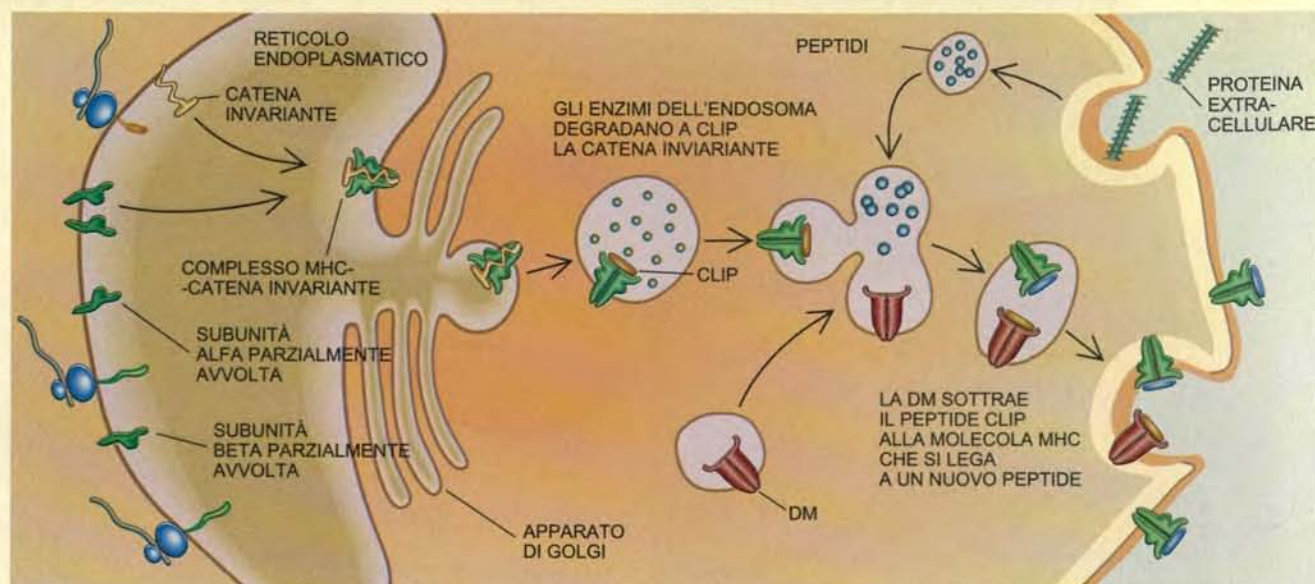
La mutazione di queste cellule sembra interferire con la capacità delle molecole MHC di classe II di legarsi a qualsiasi peptide tranne che a quelli della catena invariante. In esperimenti indipendenti, la Mullins e Pious hanno dimostrato di recente che il difetto in queste cellule interessa una molecola da poco identificata, chiamata DM, che è strutturalmente correlata alle molecole di classe II convenzionali, ma distinta da esse. Prima del loro lavoro, la funzione della DM era del tutto ignota.

Il ruolo esatto dei CLIP e della DM nella normale via di elaborazione delle molecole di classe II non è ancora noto. Un'ipotesi attraente è che un CLIP sia la parte della catena invariante che occupa fisicamente l'incavo di legame con il peptide della molecola di classe II, o almeno che alteri la struttura della molecola di classe II in modo da impedire il legame di altri peptidi. Dopo che la catena invariante è stata degradata nell'endosoma, CLIP resta ancora associato alla molecola di classe II fino a che viene attivamente rimosso dalla DM.

Come abbiamo visto, i meccanismi di elaborazione degli antigeni creano un campione rappresentativo di peptidi a partire dalla miriade di proteine che una cellula produce o ingerisce. La presentazione di questi peptidi sulle molecole MHC permette a sua volta al sistema immunitario di identificare e distruggere le cellule che ospitano agenti infettivi o che sono comunque anormali.

Le molecole MHC devono essere in grado di presentare molti peptidi estranei, e di farlo in maniera tale che il complesso appaia differente da uno formato con un peptide simile. Questa necessità spiega probabilmente perché il singolo individuo esprima diverse forme di molecole MHC di classe I e II e perché una popolazione contenga centinaia di forme. Alcune di esse hanno maggiori probabilità di altre di legarsi a peptidi di agenti patogeni specifici.

Esempi concreti del significato della varietà MHC cominciano ad apparire in letteratura. Alcuni anni fa Adrian Hill di Oxford e colleghi raccolsero dati secondo cui nell'uomo la suscettibilità alla malaria varia con l'espressione di certe molecole MHC di classe I. Le forme che sembrano conferire la massima resistenza sono particolarmente comuni in popolazioni che vivono dove la malaria è diffusa, un effetto chiaramente dovuto alla selezione naturale.

Come ci si può aspettare, tuttavia, alcuni agenti patogeni hanno imparato a combattere il sistema di elaborazione degli antigeni che tante volte li ha sconfitti. Alcuni virus, per esempio, possono sopprimere l'espressione delle molecole MHC durante i primi stadî di un'infezione. Molti tipi di adenovirus producono una molecola che si lega alle molecole MHC di classe I appena sintetizzate nel reticolo endoplasmatico e impedisce la loro espressione alla superficie cellulare. Altri adenovirus sintetizzano

La via di interazione con gli antigeni delle molecole di classe II comincia dal legame delle subunità della molecola MHC con la catena invariante. Dopo che questo complesso è passato attraverso l'apparato di Golgi, la catena invariante viene ridotta a un peptide più piccolo, chiamato CLIP. Si pensa che all'interno delle vescicole endosomiche una molecola chiamata DM sottragga CLIP al complesso MHC, liberando la molecola MHC e permettendole di legarsi con peptidi derivati da proteine extracellulari. Questo complesso finale peptide-molecola di classe II si porta allora sulla superficie cellulare.

una molecola che interferisce con l'espressione del gene per le molecole di classe I. Un'interferenza con l'espressione alla superficie cellulare delle molecole MHC di classe I è stata di recente descritta anche per il citomegalovirus e il virus dell'herpes simplex, sebbene i loro meccanismi d'azione non siano noti. Nonostante questi esempi, l'elaborazione degli antigeni in generale permette al sistema immunitario di controllare bene le infezioni.

Questo processo potrebbe essere importante anche nel controllo del cancro. Dato che molti tumori esprimono proteine mutate, il sistema immunitario potrebbe cercare peptidi derivati da queste proteine come indicatori del fatto che la cellula si è trasformata e sta per dare origine a un tumore. Sono stati identificati molti tumori nei quali l'espressione delle molecole MHC di classe I è ridotta. Manipolazioni sperimentali che incrementano l'espressione di molecole MHC spesso rendono questi tumori più controllabili da parte del sistema immunitario. Dati recenti indicano anche che alcuni tipi di cellule neoplastiche possono ridurre la propria espressione delle TAP, presumibilmente per evitare il riconoscimento da parte dei linfociti *T*.

La natura dei peptidi che i linfociti *T* specifici per le cellule neoplastiche possono riconoscere è in corso di studio. Thierry Boon e colleghi del Ludwig Institute for Cancer Research di Bruxelles hanno esaminato in dettaglio i linfociti *T* che riconoscono cellule di melanoma umano (si veda l'articolo *Come combattere il cancro attivando il sistema immunitario* di Thierry Boon in «Le Scienze» n. 297, maggio 1993). Essi hanno dimostrato che un bersaglio dei linfociti *T* sembra essere un gruppo di peptidi derivati da una proteina chiamata MAGE-1, che è espressa in molti tumori, ma è quasi irrilevabile nei tessuti normali. Boon, Steven A. Rosenberg del National Cancer Institute e i miei colleghi e io dell'Università della Virginia abbiamo anche identificato peptidi antigenici derivanti da tre proteine che vengono espresse sia da melanociti normali sia da cellule di melanoma.

Questi risultati indicano che l'efficacia dell'immunità antitumorale potrebbe essere in parte limitata dalla disponibilità di peptidi bersaglio insoliti nelle cellule neoplastiche. I tentativi di potenziare l'immunità antitumorale dovranno certamente comportare l'identificazione sulle cellule neoplastiche di complessi molecola MHC di classe I-peptide che i linfociti *T* possono riconoscere, oltre alla messa a punto di strategie per accrescerne l'immunogenicità.

Per crudele ironia, sembrano esservi dei casi in cui il sistema di elaborazione degli antigeni funziona in senso contrario a quello di mantenere in buona salute l'organismo. Nell'ultimo decennio si è fatta l'interessante scoperta che l'espressione di certe molecole MHC di classe II è correlata a molte malattie autoimmuni, come il diabete giovanile e l'artrite reumatoide, nelle quali il sistema immunitario attacca, con esiti disastrosi, i tessuti dell'ospite. Queste molecole MHC presentano probabilmente peptidi dell'ospite e così facendo inducono l'attacco immunitario. Il sistema immunitario possiede meccanismi che normalmente impediscono questo tipo di presentazione o bloccano le risposte distruttive; perché in certi casi questi meccanismi non funzionino è ancora un mistero.

In che modo la presentazione di peptidi derivati dall'organismo e da fonti estranee sia collegata allo sviluppo di queste patologie è uno dei problemi più impegnativi che oggi gli immunologi devono affrontare. Via via che il quadro si chiarirà, si potranno progettare terapie che permettano di manipolare selettivamente l'elaborazione degli antigeni. Un giorno potremo essere in grado di bloccare la presentazione di antigeni che scatenano una malattia autoimmune o di potenziare l'elaborazione di antigeni che rivelano la presenza di infezioni o tumori. Per ora, tuttavia, i misteri ancora irrisolti sono più che sufficienti a tenere impegnati gli immunologi.

BIBLIOGRAFIA

GERMAIN RONALD N. e MARGULIES DAVID H., *The Biochemistry and Cell Biology of Antigen Processing and Presentation* in «Annual Review of Immunology», 11, pp. 403-450, 1993.

SETTE ALESSANDRO (a cura), *Naturally Processed Peptides*, Karger, 1993.

STERN LAWRENCE J. e WILEY DON C., *Antigenic Peptide Binding by Class I and Class II Histocompatibility Proteins* in «Structure», 2, n. 4, 15 aprile 1994.

ENGELHARD VICTOR H., *Structure of Peptides Associated with Class I and Class II MHC Molecules* in «Annual Review of Immunology», 12, pp. 181-207, 1994.

La balia narcisina: un viaggiatore dei mari

Foto e testo di Takuya Kanouchi

Un passeriforme del gruppo dei pigliamosche, la balia narcisina (*Ficedula narcissina*) fa rotta ogni anno verso il Giappone all'inizio della stagione estiva. Centinaia di chilometri di viaggio al di sopra dell'oceano sono un'impresa straordinaria per un volatile delle dimensioni di un passero.

Non appena arrivano in Giappone, i maschi preparano il nido e iniziano a cantare per il corteggiamento. Conquistata la femmina, il maschio si accinge senza por tempo in mezzo all'accoppiamento e si dimostra più che diligente nell'adempiere il proprio dovere, nonostante le fatiche del volo non possano ancora dirsi smaltite.

La balia narcisina arriva in Giappone tra la fine di aprile e la metà di maggio. Nel breve periodo che intercorre tra l'arrivo e la partenza per le consuete aree di svernamento, che avviene in settembre, i genitori devono allevare la prole e al tempo stesso approntarsi fisicamente per il faticoso viaggio di ritorno.

Il 26 settembre 1954 si verificò un violento tifone che provocò l'affondamento del *Toyamaru*, un traghetto in servizio nello Stretto di Tsugaru. Anche gli stormi di balie narcisine sulla via del ritorno verso sud vennero travolti dal tifone. L'equipaggio di un peschereccio, riconosciuti gli uccelli migratori, puntò tutte le luci a disposizione verso di essi, anche se ciò ridusse l'energia destinata ai motori. Si salvò così un gran numero di balie narcisine. Raccontano che quando l'imbarcazione riuscì a far ritorno in porto ne era letteralmente ricoperta: le balie narcisine avevano seguito istintivamente le luci del peschereccio.

A quel tempo ero bambino e rimasi immensamente emozionato quando mi riferirono questo episodio. Oggi, i discendenti di quei piccoli uccelli migratori continuano ad affrontare il lungo viaggio di trasferimento stagionale per perpetuare la loro specie.

A sinistra
focale: 400 mm
diaframma: 5,6
esposizione: 1/60 di secondo
pellicola: ISO = 100

A destra
focale: 800 mm
diaframma: 6,7
esposizione: automatica
pellicola: ISO = 100

I microscopi confocali

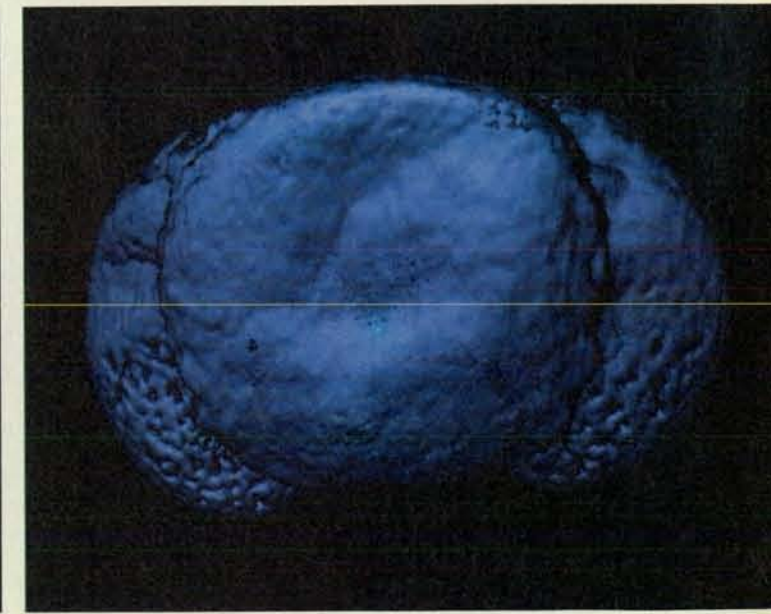
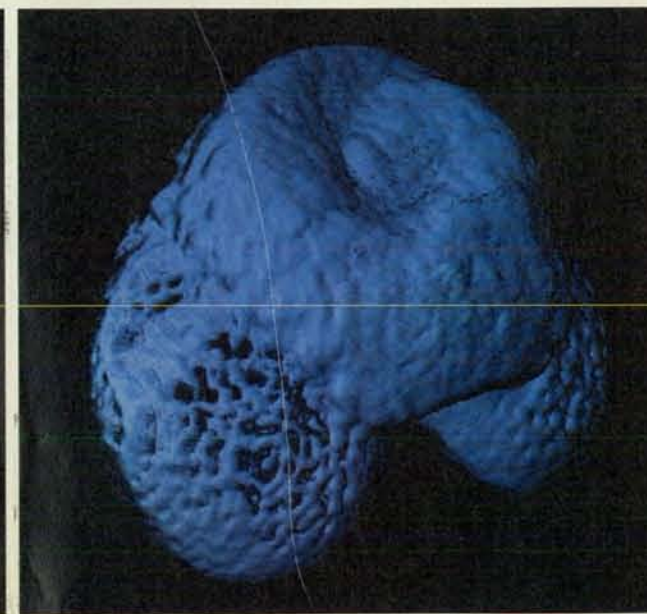
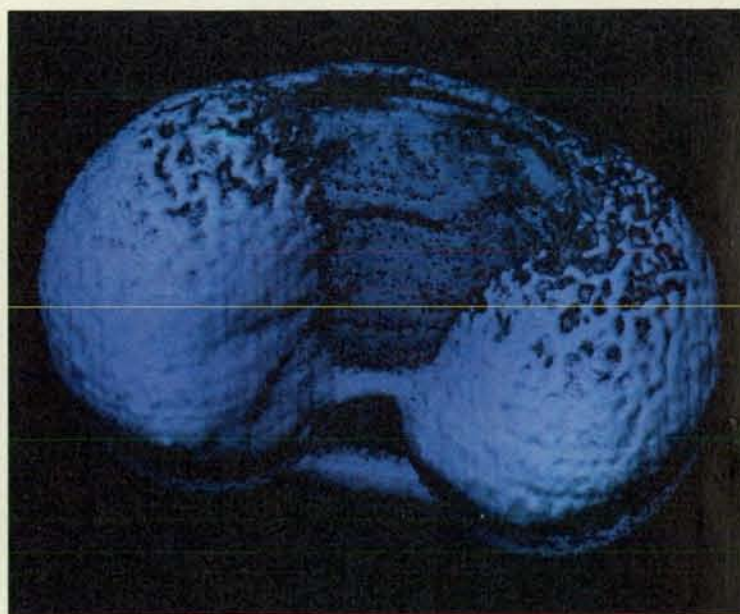
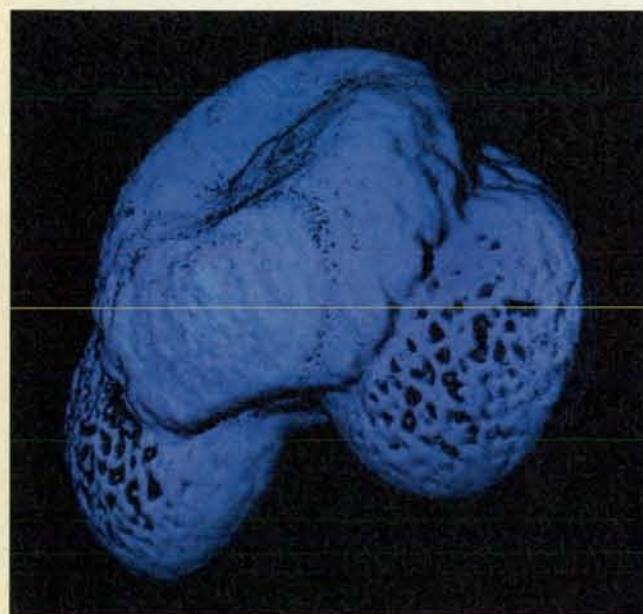
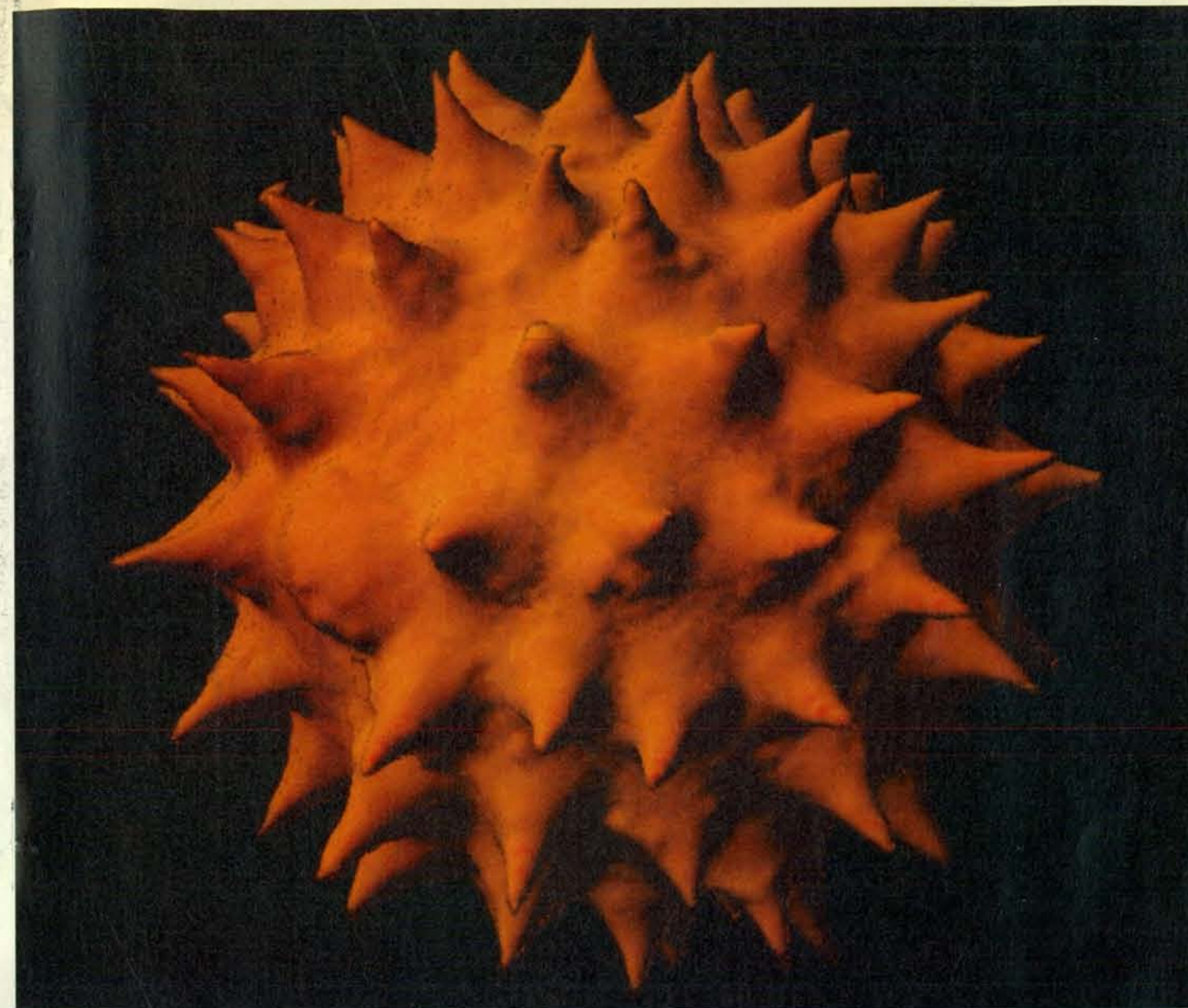
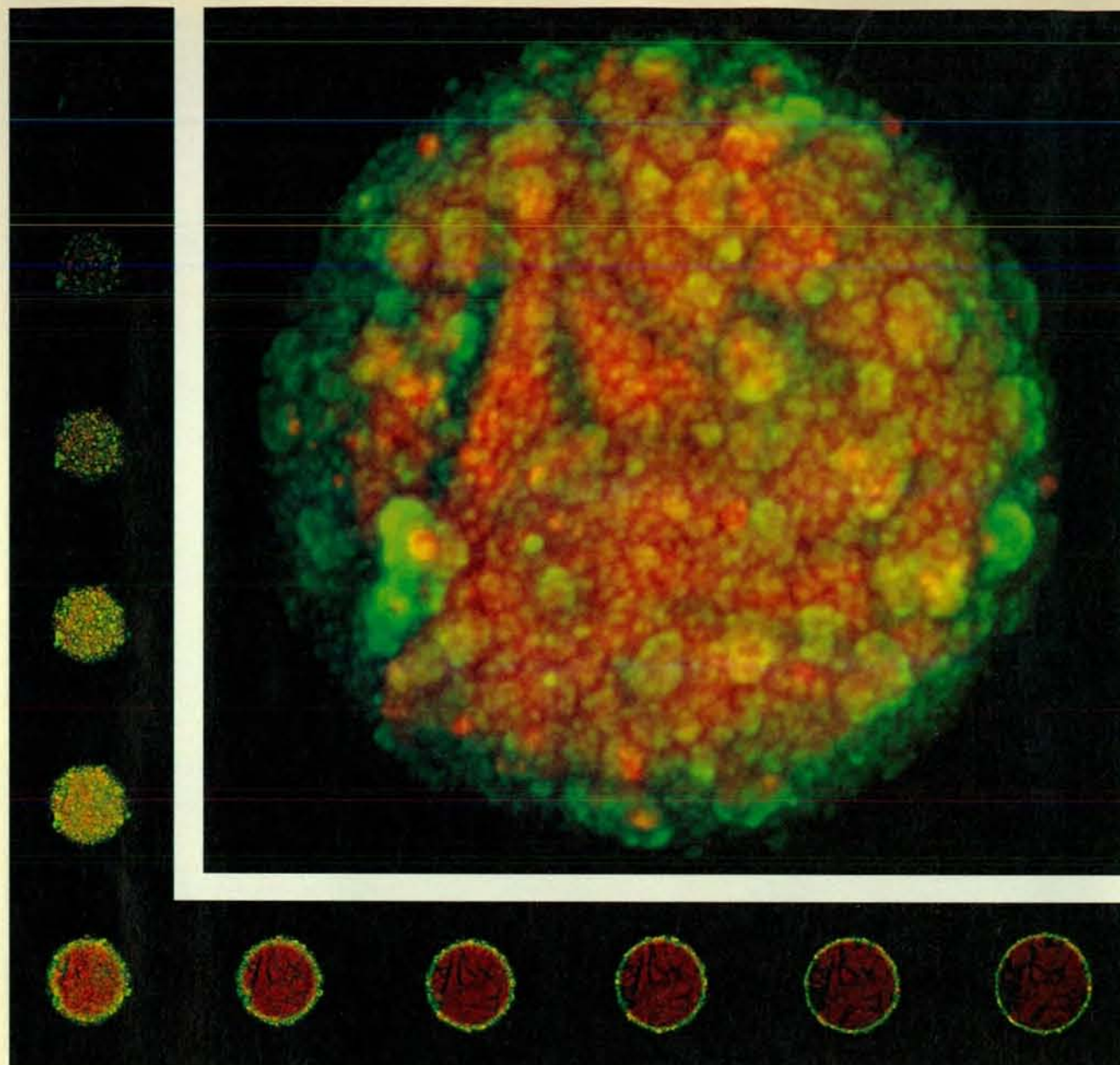
Questi strumenti, grazie ai quali è possibile realizzare immagini a due e a tre dimensioni di straordinaria nitidezza, si dimostrano di estrema utilità per l'osservazione di strati profondi di campioni biologici

di Jeff W. Lichtman

Celebre per essere il «padre» dell'intelligenza artificiale, Marvin Minsky è autore anche di un'altra significativa scoperta. Negli anni cinquanta, quando lavorava come ricercatore ad Harvard, costruì un microscopio che consentiva di osservare in successione strati sempre più profondi di un campione con stupefacente nitidezza, senza dover effettuare laboriose operazioni di sezionamento dello stesso. L'invenzione di Minsky non suscitò, all'epoca, grande clamore. In effetti nel 1961, quando egli brevettò il suo «microscopio a scansione a doppia focalizzazione», pochi capirono quali fossero le capacità dello strumento. Nei primi 17 anni di brevetto non fu costruito alcuno strumento di questo tipo e l'inventore non ricevette diritti di sorta. Scarsamente apprezzato per la sua «scorreria» nell'ottica, Minsky decise di intraprendere altre strade, lasciando il prototipo ad ammuffire in cantina.

Trent'anni più tardi il suo metodo - altresì noto come microscopia confocale - è stato ampiamente rivalutato, raggiungendo una notevole popolarità e dimostrandosi una delle scoperte più interessanti del secolo nel campo della microscopia ottica. Non è chiaro se l'attuale interesse sia stato stimolato dalla riscoperta dei primi lavori di Minsky oppure da un'autonoma reinvenzione da parte di altri; nondimeno il risultato è che oggi sono disponibili numerosi modelli di microscopi confocali, in forme che vanno dal rudimentale all'incredibilmente elaborato. Se si vuole osservare la struttura microscopica di una fetta di patata o di un chip per calcolatore, di una lesione oculare o del cervello in via di sviluppo, con la microscopia confocale è possibile vedere il materiale da studiare letteralmente «sotto una nuova luce».

Minsky, ora al Massachusetts Institute of Technology, svi-

Queste straordinarie immagini di granuli di polline di girasole (*in alto nella pagina a fronte*) e di pino (*in basso nelle due pagine*) sono state realizzate riprendendo con un microscopio confocale piani successivi di ciascun granulo trattato con un colorante fluorescente. Le immagini, o sezioni ottiche, sono digitalizzate e ricombinate al calcolatore. Queste ricostruzioni si possono eseguire sotto qualunque prospettiva: il polline di pino è mostrato (*da sinistra a destra*) da un lato, dall'altro, ruotato di 72 gradi rispetto alla prima posizione e dall'alto.

Una microcapsula polimerica piena di fluido (*la sfera grande*), del diametro di circa 0,1 millimetri, è stata ricostruita a partire da una serie di sezioni ottiche (*le sfere più piccole a sinistra e in basso*). Matthew H. Chestnut della Procter & Gamble Company ha realizzato le immagini per paragonare la resistenza strutturale della capsula con quella di capsule di diversa composizione. Per distinguere l'involucro (*in verde*) dal fluido (*in rosso*) li ha trattati con coloranti diversi. Un'analisi dettagliata delle immagini non ha rivelato rotture dell'involucro, ma ha mostrato che stava avvenendo qualche perdita.

luppò questa tecnica mentre cercava di capire il funzionamento del cervello umano. Egli ipotizzò che, se si fosse riusciti a costruire una mappa di tutte le connessioni tra neuroni, lo schema circuitale risultante avrebbe fornito indicazioni sull'attività cerebrale. Purtroppo, se si cerca di impiegare la microscopia ottica convenzionale per individuare le interconnessioni tra le cellule nervose in un campione di tessuto cerebrale, ci si imbatte immediatamente in un serio ostacolo tecnico.

Nei microscopi tradizionali la lente o il sistema di lenti deputati all'ingrandimento - cioè l'obiettivo - hanno la duplice funzione di illuminare il campione e di consentirne la visione. Quando l'obiettivo focalizza la luce al di sotto della superficie del tessuto (o di qualunque altro materiale spesso e semitrasparente) l'immagine diventa rapidamente incomprensibile. Cercare di osservare le connessioni tra i neuroni in un simile tessuto è come tentare di vedere un oggetto sotto la superficie di uno stagno fangoso facendo lampeggiare un flash sotto il pelo dell'acqua; la luce viene riflessa da una tale quantità di minuscole particelle che diventa impossibile distinguere l'oggetto da ciò che lo circonda.

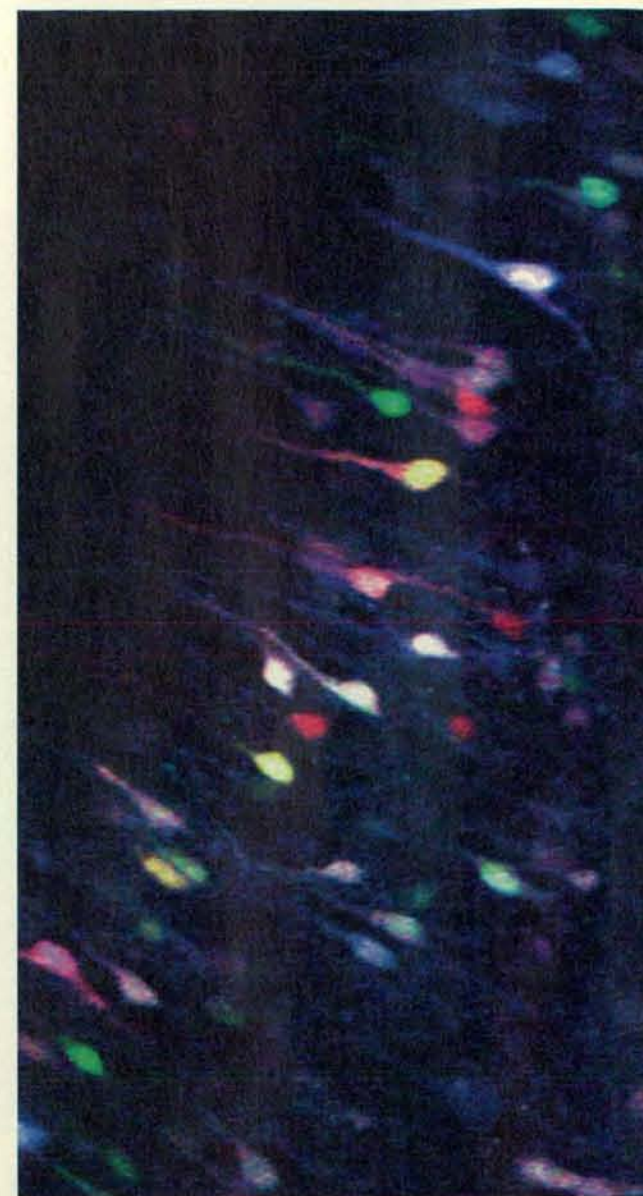
Per ottenere una perfetta rappresentazione di un singolo piano del campione, si dovrebbe idealmente raccogliere soltanto la luce riflessa da quel particolare piano; ma anche la materia al di sopra e al di sotto del piano in questione riflette la radiazione luminosa, provocando un annebbiamento dell'immagine che è la vera rovina della microscopia ottica. Nel contempo un altro fastidioso fenomeno, la diffusione, può ridurre il contrasto dell'immagine. La diffusione avviene quando la luce colpisce minuscole particelle e rimbalza tra di esse prima di raggiungere la superficie di rivelazione. I segnali prodotti da questa radiazione dispersa in direzione casuale non portano informazioni significative, ma creano una luminosità diffusa che può sovrapporsi alla luce proveniente dal piano che si intende osservare.

Minsky riuscì a minimizzare l'annebbiamento e a migliorare il contrasto grazie a qualche modifica ai microscopi tradizionali. Innanzitutto cercò di prevenire, per quanto possibile, la diffusione facendo passare la luce che illumina il campione attraverso un obiettivo che la focalizza in un fascio a forma di clessidra (*si veda l'illustrazione a pagina 60*) e dirigendo la parte centrale del fascio - dove la luce ha la massima intensità - su un punto del campione situato alla profondità desiderata. Questo procedimento assicurava che il punto prescelto fosse quello più illuminato di tutto il campione, e quindi producesse la luce riflessa più intensa. La focalizzazione della luce su una piccola regione, inoltre, garantiva a Minsky che la luce diffusa dalle altre zone del campione fosse minima. Nei microscopi tradizionali viene invece illuminato l'intero campione, che può così diffondere la luce incidente in tutte le direzioni.

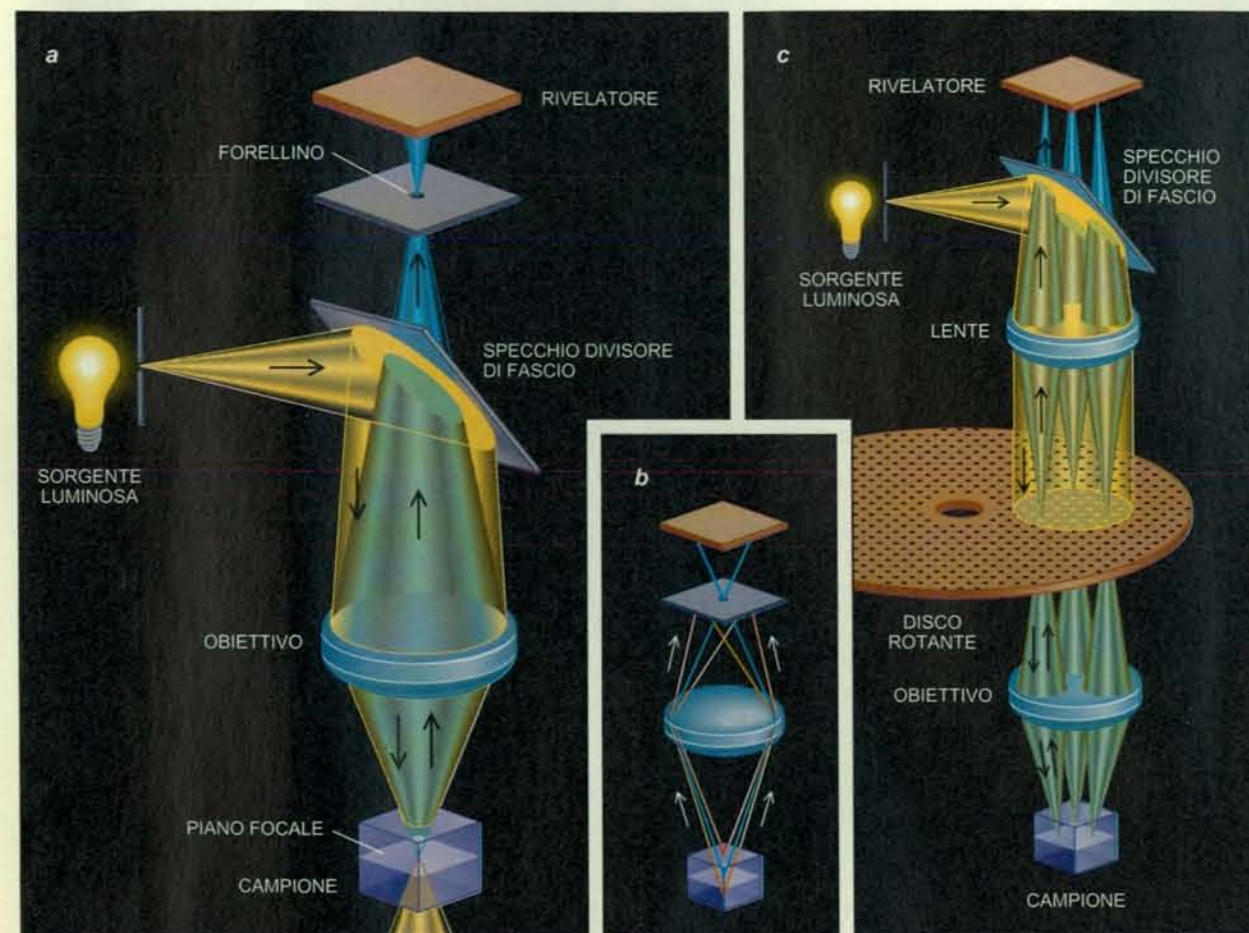
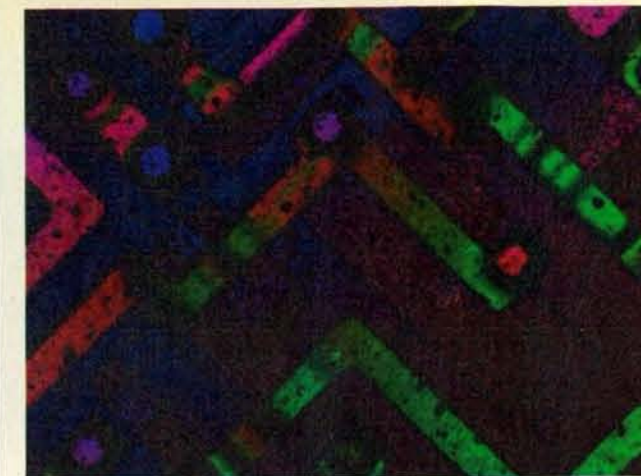
La strategia di focalizzare la luce su un'area ristretta limitava la quantità globale di luce diffusa, ma non impediva che questa venisse riflessa e diffusa dagli strati del campione situati al di sopra e al di sotto di quello desiderato (che si trovavano all'interno del fascio a clessidra). Con una seconda fondamentale modifica, Minsky riuscì a ottenere che la maggior parte di questa luce spuria non raggiungesse la superficie di rivelazione. Dato che l'obiettivo focalizzava la luce riflessa dalla zona desiderata su un piano situato molto al di sopra del campione, egli dispose su quel piano una maschera dotata di un forellino, collocando l'apertura in modo che la luce riflessa la attraversasse prima di arrivare alla superficie di rivelazione. L'effetto fu impressionante: mentre il fascio luminoso proveniente dalla zona del campione più intensamente illuminata raggiungeva il rivelatore passando attraverso il forellino, la luce che proveniva dalle regioni adiacenti veniva «filtrata» dalla maschera. Il risultato era un'immagine pressoché perfetta della zona desiderata, non disturbata dalla diffusione della luce proveniente da aree non a fuoco.

Il problema causato dalle modifiche di Minsky era che si ottenevano immagini solo di regioni molto piccole del campione. Per avere una rappresentazione altrettanto efficace di un intero piano l'inventore aggiunse un ultimo tocco: la scansione. Fece muovere il campione di punto in punto lungo un reticolo, in modo che ogni zona situata alla profondità voluta fosse illuminata dal fascio focalizzato e, secondo una precisa sequenza, inviasse un segnale perfetto al rivelatore.

Per visualizzare l'immagine di un intero piano del campione, fece incidere la luce che attraversava la maschera su un fotomoltiplicatore che, a sua volta, generava un flusso di corrente elettrica che produceva un'immagine su uno schermo radar militare a lunga persistenza. Alzando o abbassando l'obiettivo e ripetendo il procedimento di scansione si poteva visualizzare sullo schermo un altro piano del campione. La scelta di impiegare uno schermo grande fu forse un errore strategico. Quando Minsky chiedeva ad amici e colleghi di Harvard di dare un'occhiata alla sua invenzione, spesso gli osservatori si trovavano in difficoltà a interpretare quanto ve-

In questa porzione di tessuto cerebrale di roditore mantenuta in vita artificialmente sono evidenziati i neuroni in attività (*corpi colorati*) Tre immagini confocali ottenute a distanza di 12 secondi sono state combinate al calcolatore da Michael E. Dailey e Stephen J. Smith della Stanford University. Ogni «scatto» era individuato da un diverso colore: il primo rosso, il secondo verde, il terzo blu. L'immagine rivela che i neuroni si attivano in momenti diversi e che alcuni di essi sono attivi in due istanti (*in giallo*) o persino in tutti e tre (*in bianco*).

In questa sequenza di fotogrammi la ricostruzione tridimensionale di un neurone è ruotata in ciascuna immagine di 10 gradi rispetto all'asse verticale, producendo un film della cellula che ruota. Incrociando gli occhi mentre si guardano due immagini e mettendo a fuoco con ciascun occhio un diverso fotogramma è possibile vedere il neurone in tre dimensioni.

Come funziona un microscopio confocale

I microscopi confocali permettono di osservare con elevata risoluzione un singolo piano di un campione. Innanzitutto, la luce (*giallo in a*) viene focalizzata mediante un obiettivo in un fascio a forma di clessidra, in modo che la porzione più ristretta del fascio colpisca una piccola regione alla profondità voluta nel campione. Quindi la luce riflessa da quella regione (*blu*) viene focalizzata in un punto e fatta passare attraverso un forellino in una maschera posta davanti al rivelatore. Nello stesso tempo la maschera blocca la maggior parte della luce riflessa dalle parti del campione che si trovano sopra (*rosso in b*) e sotto (*arancione*) il piano che interessa, luce che tenderebbe a confondere l'immagine risultante. Infine la luce viene fatta scorrere rapidamente sul campione finché non viene analizzato l'intero piano. La straordinaria nitidezza che caratterizza le immagini così ottenute è evidenziata dalle microfotografie in basso, una (*a sinistra*) prodotta con un microscopio tradizionale, l'altra con un microscopio confocale. Entrambe le immagini raffigurano un muscolo di topo trattato con un colorante fluorescente per evidenziare i punti di connessione con un motoneurone. Per rendere più veloce il procedimento di scansione, alcuni microscopi confocali sono dotati di un disco che contiene centinaia di forellini, attraverso i quali viene inviata e raccolta la luce (*c*); il disco ruota per garantire che nella scansione venga coperto ogni punto del piano.

La superficie di un chip è mostrata in una normale microfotografia (*a sinistra*) e in un'immagine confocale composita (*a destra*) nella quale si sono sovrapposte scansioni eseguite su tre piani. Lo strato più profondo è in verde, il più superficiale in rosso. Rispetto alla microfotografia tradizionale, quella confocale dà informazioni più precise relative alla profondità.

devano. Come comprese successivamente Minsky, lo schermo era troppo esteso.

«Mostrai il microscopio confocale a molti visitatori, ma non parvero mai molto impressionati da ciò che vedevano sullo schermo radar» annota Minsky in una memoria del 1988. «Soltanto più tardi compresi che non è sufficiente che uno strumento *abbia* un elevato potere risolutivo; è necessario anche fare in modo che l'immagine *sembri* chiara. Forse il cervello umano richiede un certo grado di compressione foveale per sfruttare al meglio le sue capacità visive. In ogni caso, avrei dovuto usare una pellicola, o perlomeno installare uno schermo più piccolo!» Tuttavia non lo fece, e forse per questa ragione la microscopia confocale è stata condannata a languire per decenni.

A dispetto del disinteresse iniziale, studiosi e fabbricanti hanno ideato da allora molti modi per combinare le caratteristiche fondamentali della microscopia confocale: l'illuminazione di una piccola regione del campione, il passaggio della luce riflessa attraverso un'apertura posta lungo la congiungente tra la regione illuminata e l'obiettivo, la scansione del campione. Sono poche le versioni nelle quali si fa muovere il campione; nella maggior parte dei modelli attuali è il fascio luminoso a spostarsi. Per aumentare la velocità di acquisizione delle immagini, alcuni microscopi muovono il fascio di luce tramite specchi rotanti che costringono la luce che incide su di essi a scorrere rapidamente lungo il campione in una scansione regolare. Questi specchi rendono possibile la ricostruzione di un'intera immagine in meno di un secondo. Strumenti di questo genere richiedono sorgenti più luminose di quelle di cui disponeva Minsky; in effetti, è necessario produrre quasi istantaneamente un segnale rivelabile da ogni piccola regione. I laser, essendo sorgenti luminose molto intense e collimate, sono largamente impiegati per questo genere di applicazioni.

Un'altra tecnica per risparmiare tempo sfrutta fasci luminosi multipli per scandire simultaneamente svariate zone del campione, più o meno come i calcolatori paralleli svolgono contemporaneamente operazioni diverse. Alcuni dispositivi incorporano dischi rotanti con diverse aperture, attraverso le quali passano sia la luce incidente sia quella riflessa. Altri sono invece dotati di aperture a forma di fenditura che riducono i tempi di scansione illuminando sottili bande del campione anziché punti. Le tecniche per la scansione rapida hanno permesso l'osservazione di piani completi di un campione in tempo reale, spesso direttamente attraverso un oculare.

Gran parte dei moderni microscopi confocali beneficia enormemente di un altro rivoluzionario progresso: lo sviluppo di calcolatori che eseguono l'elaborazione digitale delle immagini. Scandendo piani successivi di un campione, il microscopio confocale produce un'enorme quantità di immagini, ciascuna delle quali è una sezione ottica; queste sezioni sono analoghe a immagini di «fette» sottili che siano state fisicamente sezionate dal campione iniziale. I programmi per l'elaborazione di immagini non registrano soltanto la luminosità di ciascun punto di ogni sezione, ma anche la sua localizzazione nel campione, cioè la posizione in un piano (coordinate x e y) e la profondità (coordinata z): i punti definiti dalle tre coordinate, detti voxel, costituiscono l'equivalente tridimensionale dei pixel di un'immagine bidimensionale.

I programmi per l'elaborazione delle immagini possono combinare i voxel per produrre ricostruzioni tridimensionali di oggetti microscopici. Grazie a essi si possono anche manipolare i voxel con facilità, per ruotare le immagini ricostruite lungo un asse o vederle da una prospettiva favorevole. L'avvento di questa tecnologia ha permesso di compiere facilmente operazioni che spesso sarebbero molto costose e lunghe da effettuare con altri strumenti. Per esempio gli studiosi del cervello hanno trovato i microscopi confocali collegati a calcolatori estremamente utili per rivelare in dettaglio la struttura del sistema nervoso, e stanno incominciando a osservare il tessuto cerebrale *in vivo* grazie a questi dispositivi.

Dopo un esordio molto modesto, la microscopia confocale è diventata una tecnologia ultrasofisticata che combina laser, dispositivi ottici, scansione elettromeccanica ed elaborazione computerizzata delle immagini, consentendo di guardare all'interno degli oggetti e di creare quasi a volontà immagini perfettamente tridimensionali. Sembra che il sogno di Minsky di costruire per mezzo di un microscopio una mappa completa dei circuiti cerebrali stia finalmente realizzandosi.

BIBLIOGRAFIA

WHITE J. G., AMOS W. B. e FORDHAM M., *An Evaluation of Confocal Versus Conventional Imaging of Biological Structures by Fluorescence Light Microscopy* in «Journal of Cell Biology», 105, n. 1, luglio 1987.

MINSKY M., *Memoir on Inventing the Confocal Scanning Microscope* in «Scanning», 10, n. 4, luglio/agosto 1988.

LICHTMAN J. W., SUNDERLAND W. J. e WILKINSON R. S., *High-Resolution Imaging of Synaptic Structure with a Simple Confocal Microscope* in «New Biologist», 1, n.1, ottobre 1989.

WILSON TONY (a cura), *Confocal Microscopy*, Academic Press, 1990.

Gli SQUID

Questi dispositivi superconduttori a interferenza quantistica sono fra i rivelatori più sensibili, con impieghi che vanno dalla diagnosi medica alla prospezione geofisica e all'individuazione di onde gravitazionali

di John Clarke

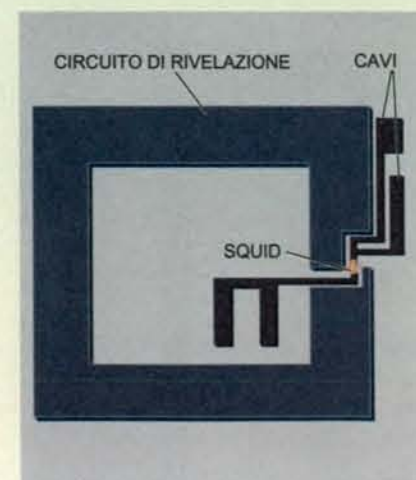
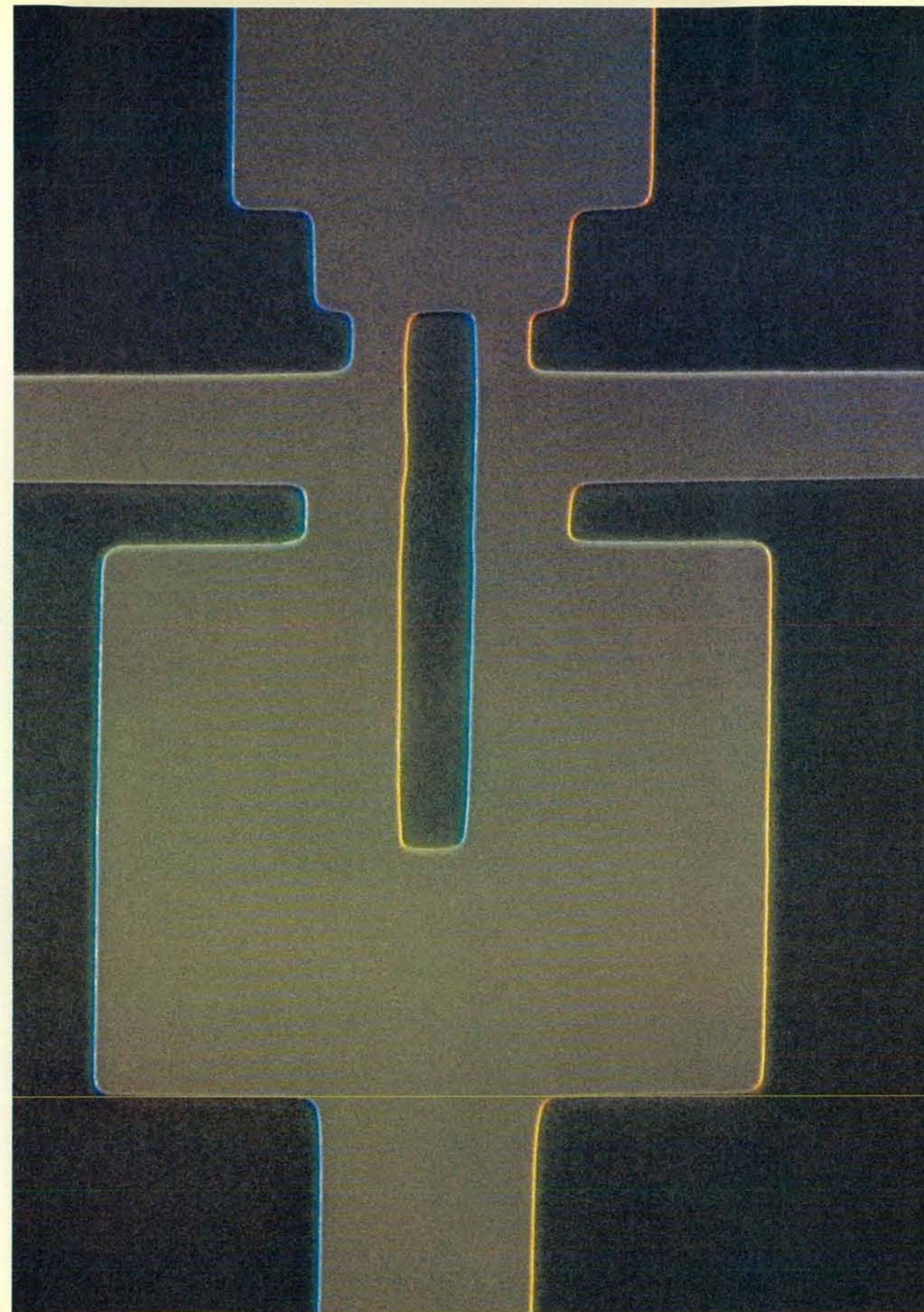
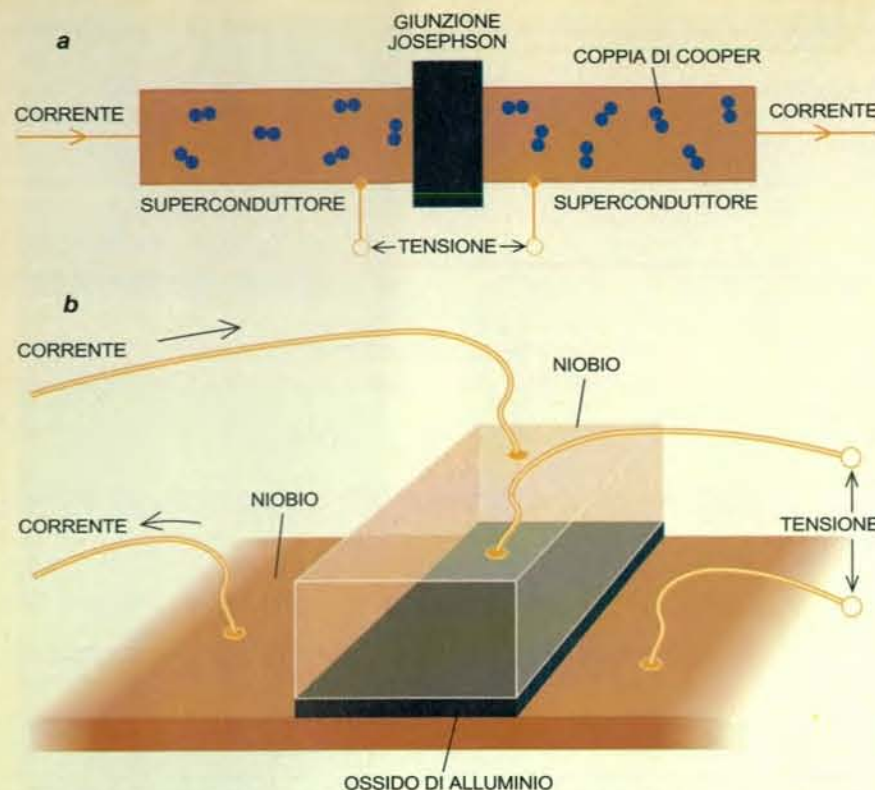
Una schiera di rivelatori collocata accanto alla testa di un paziente sofferente di epilessia focale, rilevando piccole fluttuazioni del campo magnetico, riesce a localizzare la lesione cerebrale responsabile della sindrome; una barra di alluminio di cinque tonnellate sospesa in una camera a vuoto e tenuta a una temperatura vicina allo zero assoluto può percepire le minuscole perturbazioni che precedono un'onda gravitazionale proveniente da una supernova; un singolo strumento situato nella Bassa California, registrando minuscole variazioni del campo magnetico, contribuisce alla localizzazione di eventuali sorgenti di energia geotermica nel sottosuolo.

Misurazioni così disparate sono consentite da un dispositivo superconduttore a interferenza quantistica, lo SQUID (da Superconducting Quantum Interference Device). Per quanto riguarda le variazioni di campo magnetico, oggi lo SQUID è il rivelatore più sensibile a disposizione degli scienziati - con limiti costituiti solo dagli effetti quantistici intrinseci - ed è diventato il dispositivo superconduttore di piccola scala di gran lunga più usato. Benché non sia un'invenzione particolarmente nuova - ha compiuto 30 anni nel 1993 - le sue possibilità di applicazione si sono moltiplicate negli ultimi tempi. La messa a punto, alla fine degli anni ottanta, dei superconduttori ad alta temperatura ha fatto sì che gli SQUID possano funzionare in azoto liquido, a una temperatura «elevata» di 77 kelvin (−196 gradi Celsius). Stando così le cose, i nuovi SQUID saranno sempre più semplici da utilizzare e avranno un numero sempre maggiore di applicazioni rispetto ai superconduttori convenzionali che funzionano solo a temperature vicine allo zero assoluto.

Le proprietà fenomenologiche dello SQUID derivano dalla combinazione di vari effetti quantistici, il più evidente tra i quali è il flusso senza resistenza di corrente elettrica. Lo scienziato olandese Heike Kamerlingh Onnes ottenne il premio Nobel per aver scoperto nel 1911 che il mercurio diventa superconduttore quando viene raffreddato tramite elio liquido a 4,2 kelvin. In seguito è stato dimostrato che molti altri metalli (per esempio stagno, piombo, niobio) e numerose leghe perdono del tutto la resistenza alla corrente elettrica se vengono raffreddati a basse temperature.

Per sapere perché taluni materiali diventano superconduttori si è dovuto attendere fino al 1957, quando John Bardeen, Leon N. Cooper e J. Robert Schrieffer pubblicarono i lavori teorici che li condussero al premio Nobel. Al centro della loro teoria, chiamata BCS, vi è la coppia di Cooper, costituita da due elettroni con spin e quantità di moto opposti legati assieme, cosicché il totale netto degli spin e delle quantità di moto è zero. La forza attrattiva che è alla base di questo legame è una elusiva interazione tra la carica negativa degli elettroni e la carica positiva degli ioni del materiale superconduttore. Questi ioni sono semplicemente atomi che hanno perso uno o più dei loro elettroni esterni, diventati liberi di condurre elettricità. Gli ioni sono attirati verso un elettrone che si muove attraverso il reticolo del solido, creando così una regione arricchita di carica positiva. Questa regione attira a sua volta un altro elettrone che si trova nelle vicinanze. Il legame fra i due elettroni è debole, con un'energia tipica di un millielettronvolt.

Come fanno gli elettroni accoppiati a muoversi senza resistenza, mentre quelli singoli non vi riescono? Nei conduttori ordinari impurezze, difetti e, in special modo, vibrazioni reticolari chiamate fononi deflettono il movimento degli elettroni singoli. Questa diffusione di elettroni rende la sostanza resistiva. Anche se l'energia che lega gli elettroni in una coppia di Cooper è bassa, è però sufficiente per impedire che la coppia venga divisa dalla diffusione. Di conseguenza, le coppie di Cooper si propagano nel materiale senza incontrare resistenza. Il raffreddamento è essenziale perché blocca le vibrazioni reticolari; a temperature superiori l'energia termica diventa abbastanza elevata da distruggere la coppia di Cooper.

Una particolarità notevole di un superconduttore riguarda la sua funzione d'onda, un oggetto matematico cui si ricorre per rappresentare le particelle nei sistemi quantistici. Come ogni altra onda, questa funzione ha un'ampiezza e una fase, ed esprime la probabilità che una data particella si trovi in un luogo particolare in un momento particolare. Stranamente, per i superconduttori una singola funzione d'onda può descrivere

Un magnetometro a SQUID è inciso in un singolo strato di superconduttore ad alta temperatura. Lo SQUID in sé (*fotografia*) è largo circa 30 micrometri. I due bordi di grani che fungono da giunzioni Josephson (*non visibili*) giacciono appena sopra la striscia orizzontale che attraversa l'immagine. La striscia è accoppiata a un circuito di rivelazione largo circa otto millimetri (*qui sopra*).

La giunzione Josephson consiste di una barriera isolante che separa due superconduttori (*a*). Le coppie di Cooper di elettroni attraversano la barriera per effetto tunnel. In una realizzazione pratica della giunzione (*b*), un film di ossido di alluminio, che funge da barriera, separa due strati di niobio. Questo «triplo strato», fatto crescere su un substrato di silicio in una camera a vuoto, è poi modellato per formare giunzioni Josephson singole, tipicamente di qualche micrometro di diametro.

un'intera collezione di coppie di Cooper. Quando non c'è flusso di corrente, tutte le coppie hanno la stessa fase, ossia sono coerenti in fase.

Un terzo lavoro che ha meritato il Nobel e che è stato essenziale per lo SQUID va ascritto a Brian D. Josephson, che previde teoricamente l'effetto che porta il suo nome. Nel 1962, ricercatore all'Università di Cambridge, Josephson studiò due superconduttori separati da uno strato di materiale isolante che agisce da barriera al flusso di corrente (*si veda l'illustrazione in questa pagina*). Le funzioni d'onda quantistiche associate alle coppie di Cooper penetrano da ciascun lato in questa regione «proibita» e, nel caso lo spessore della barriera non sia troppo grande, finiscono per sovrapporsi. Se la sovrapposizione è sufficiente, le fasi delle due funzioni d'onda si uniscono. In queste condizioni, le coppie di Cooper possono passare per effetto tunnel attraverso la barriera senza dividersi, e quindi la giunzione funziona come un debole superconduttore. La corrente critica - vale a dire la supercorrente massima che può attraversare la giunzione - dipende dalla dimensione della giunzione, dal tipo di materiale superconduttore e dalla temperatura.

Questo fenomeno, che prende il nome di effetto Josephson in corrente continua, venne verificato alcuni mesi più tardi da Philip W. Anderson e John M. Rowell dei Bell Telephone Laboratories. Esiste anche un effetto in corrente alternata: in questo caso una tensione mantenuta attraverso la giunzione fa sì che l'ampiezza della supercorrente oscilli nel tempo.

Al di là del ruolo che svolgono negli SQUID, le giunzioni Josephson trovano molte altre applicazioni. Dato che possono commutare rapidamente dallo stato di superconduzione allo stato resistivo - in circa uno o due picosecondi - esse vengono impiegate in componenti digitali ultraveloci, registri a scorrimento e convertitori analogico-digitali. Nei laboratori dove si fissano gli standard delle unità di misura, le giunzioni Josephson vengono utilizzate come riferimento per il volt. Irradiando una giunzione con microonde di una data frequenza, si inducono gradini di tensione; questi gradini si presentano a tensioni che sono esattamente multipli interi di quella frequenza.

Oltre alla resistenza nulla e all'effetto Josephson, lo SQUID sfrutta un terzo fenomeno quantistico: la quantizzazione del flusso. Noi siamo abituati a pensare alla quantizzazione come a qualcosa che avviene su scala atomica: per esempio, l'occupazione di livelli energetici discreti da parte degli elettroni di un atomo. Un effetto analogo avviene a scala macroscopica in anelli superconduttori. Un flusso di corrente che scorre attorno all'anello produce un campo magnetico che penetra nell'anello stesso. Il prodotto del campo magnetico per l'area sottesa dall'anello - il flusso magnetico - non può assumere valori arbitrari, ma deve essere uguale a un numero intero di quanti di flusso. Un quanto di flusso è estremamente piccolo: un globulo rosso del sangue, di circa sette micrometri di diametro, posto nel campo magnetico terrestre (che è all'incirca 0,00005 tesla) abbraccia circa un quanto di flusso.

Uno SQUID in corrente continua è piuttosto semplice. Esso consiste di due giunzioni Josephson disposte in un anello superconduttore (*si veda la finestra nella pagina a fronte*). Applicando corrente allo SQUID (ossia polarizzandolo), coppie di Cooper di elettroni attraversano le giunzioni per effetto tunnel. Un campo magnetico applicato all'anello, tuttavia, altera il flusso, ossia cambia la differenza di fase quantistica attraverso ciascuna delle due giunzioni. A loro volta questi cambiamenti di fase influiscono sulla corrente critica dello SQUID. Un progressivo aumento o una diminuzione del campo magnetico fa sì che la corrente oscilli tra un valore massimo e uno minimo. Il valore massimo si ha quando il flusso fornito allo SQUID è uguale a un numero intero di quanti di flusso attraverso l'anello, mentre il valore minimo corrisponde a un numero semi-intero di quanti. (Il flusso applicato allo SQUID può assumere qualsiasi valore, a differenza del flusso contenuto in un anello superconduttore chiuso, che deve essere un numero intero.) In pratica, non misuriamo la corrente, ma la tensione ai capi dello SQUID, che oscilla anch'essa avanti e indietro in un campo magnetico che cambia costantemente.

Questo effetto di interferenza quantistica fornisce un magnetometro digitale, in cui ciascun «numero» rappresenta un quanto di flusso. In effetti con elettroniche convenzionali si possono rilevare tensioni corrispondenti a variazioni di flusso magnetico molto minori di un quanto di flusso. Lo SQUID è essenzialmente un trasduttore flusso-tensione, che converte in tensione una minuscola variazione di campo magnetico.

Agli inizi della mia carriera, quando ero ricercatore a Cambridge, il mio supervisore, Brian Pippard, mi propose di usare uno SQUID per costruire un voltmetro altamente sensibile. A quei tempi i procedimenti per fabbricare le giunzioni Josephson erano primitivi e non utilizzabili per produrre strumenti. Nei primi mesi del 1965, nel corso del tradizionale tè del pomeriggio al Cavendish Laboratory, ne discussi con un collega, Paul C. Wraight. A suo parere, una goccia fusa di lega per saldatura (una lega di piombo e stagno che diventa superconduttrice alla temperatura dell'elio liquido) depositata su un filo di niobio avrebbe forse potuto formare una giunzione Josephson. Il niobio ha infatti uno strato di ossido nativo che potrebbe comportarsi da barriera tunnel.

Tornati precipitosamente in laboratorio e ottenuto un po' di filo di niobio da un collega, vi facemmo colare sopra una goccia di lega per saldatura, vi fissammo alcuni cavi e lo immergemmo in elio liquido. Come speravamo, ecco la giunzione Josephson! Il fatto che l'idea di Wraight funzionasse al primo colpo fu importante; in caso contrario non ci avremmo più provato. Successivamente riuscii a costruire un voltmetro in grado di misurare 10 femtovolt (10^{-14} volt): un miglioramento di un fattore 100 000 rispetto ai voltmetri convenzionali a semiconduttori.

È inutile dire che negli anni successivi la tecnologia dei sensori SQUID si è evoluta al di là di ogni previsione. La maggior parte dei moderni SQUID in corrente continua è basata su un progetto proposto da Mark B. Ketchen e Jeffrey M. Jaycox del Thomas J. Watson Research Center della IBM. Questi dispositivi consistono di strati multipli di film sottili depositati su wafer di silicio e lavorati con le tecniche fotolitografiche e di incisione proprie dell'industria dei semiconduttori. Con questi metodi è possibile produrre anche 400 SQUID su un wafer di quattro pollici. Il wafer viene poi tagliato in singoli chip contenenti ciascuno uno SQUID. Lo SQUID di per sé consiste di una «vaschetta» quadrata di niobio che ha due giunzioni Josephson. Le barriere sono formate da ossido di alluminio, un isolante, fatto depositare su uno degli strati di niobio (*si veda l'illustrazione a pagina 68*).

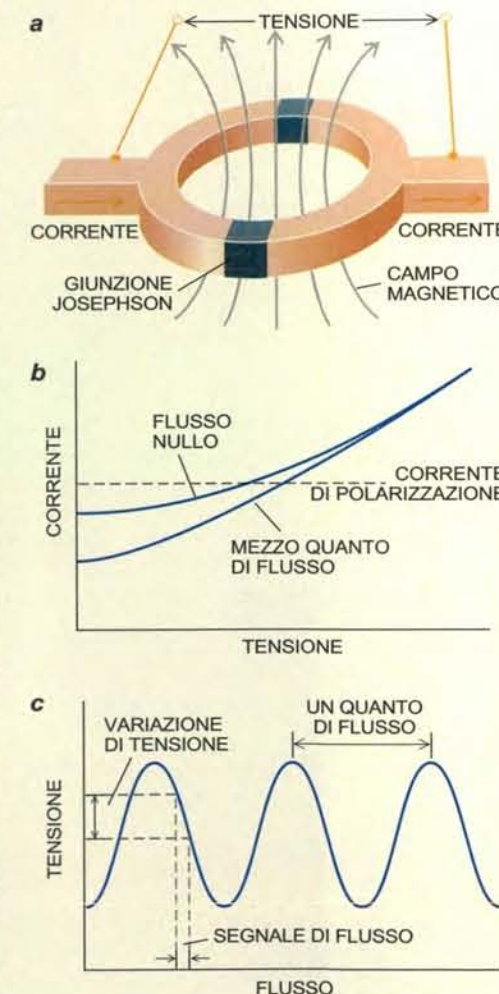
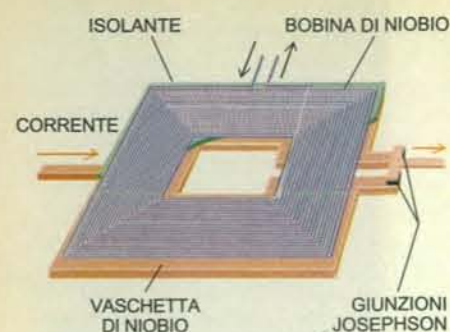
Quanto è sensibile uno SQUID? Si può valutarlo se si considera l'energia associata alla più piccola variazione di flusso magnetico che il dispositivo può rilevare in un secondo: tipicamente circa 10^{-32} joule. Questa quantità incredibilmente piccola è grosso modo uguale all'energia meccanica necessaria per sollevare di un millimetro un singolo elettrone nel campo gravitazionale terrestre. In realtà, gli SQUID migliori finora costruiti sono ancora 100 volte più sensibili. Essi si avvicinano al confine imposto dal principio di indeterminazione di Heisenberg, che stabilisce limiti fondamentali all'accuratezza delle misurazioni.

Dovrei menzionare anche gli SQUID basati sulla corrente alternata, denominati SQUID a radiofrequenza perché vengono polarizzati con un flusso oscillante a frequenze dell'ordine dei megahertz. Lo SQUID a radiofrequenza consiste di una singola giunzione Josephson in un anello superconduttore, accoppiato a un induttore collegato trasversalmente a un condensatore. Questa configurazione forma il cosiddetto circuito risonante, che è pilotato da una corrente a radiofrequenza. L'ampiezza della tensione a radiofrequenza attraverso il circuito oscilla in risposta a un flusso magnetico.

Gli SQUID a radiofrequenza sono stati commercializzati molto prima degli SQUID in corrente continua, anche se questi ultimi erano più sensibili. Presumibilmente i primi erano di più facile fabbricazione perché ciascun dispositivo richiedeva una sola giunzione. Oggi la tecnologia dei film sottili è molto avanzata e consente di produrre grandi quantità di giunzioni con un alto grado di affidabilità. Per questa ragione la maggior parte degli SQUID in commercio è del tipo in corrente continua. Nondimeno, gli SQUID a radiofrequenza non sono scomparsi dalla scena, poiché molti ricercatori li trovano adeguati.

Per sfruttare la sua straordinaria sensibilità, lo SQUID è quasi sempre accoppiato a un circuito d'ingresso. Nei magnetometri questo circuito potenzia anche di 100 volte la sensibilità dello SQUID ai campi magnetici. Chiamato «trasformatore di flusso», esso consiste semplicemente di un anello di materiale superconduttore che, accoppiato a uno SQUID, riesce a incrementare la sensibilità al campo magnetico in quanto racchiude un'area più grande di quella dello SQUID (*si veda l'illustrazione a pagina 69*). Un campo magnetico esterno fa sì che una supercorrente circoli costantemente nell'anello e induca un

Lo SQUID in corrente continua

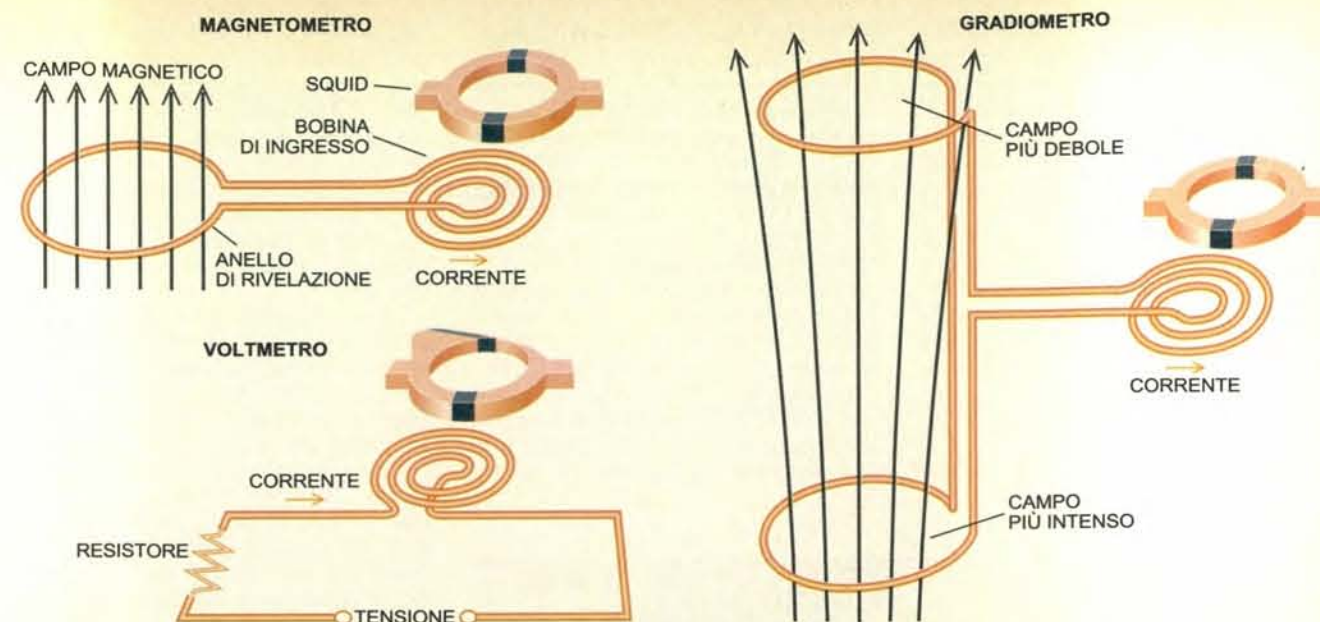
Lo SQUID in corrente continua è costituito da due giunzioni Josephson posizionate su un anello superconduttore (*a*). Una corrente di polarizzazione applicata allo SQUID si suddivide tra le giunzioni e, se è più elevata della corrente critica, produce una tensione attraverso lo SQUID. Riportando su un grafico questa corrente in funzione della tensione si ottengono curve caratteristiche (*b*). Se si aumenta costantemente il flusso magnetico che passa nell'anello (per esempio con l'introduzione di un piccolo magnete), la corrente critica diminuisce e poi aumenta. La corrente critica è massima per un flusso nullo (o un numero intero di quanti di flusso) e minima per un numero semi-intero di quanti di flusso. Il periodo di queste oscillazioni è il quanto di flusso (*c*). Questo effetto è strettamente analogo all'esperimento ottico delle due fenditure: quando luce coerente (come quella laser) attraversa due fenditure parallele, i raggi emergenti «interferiscono» l'uno con l'altro e producono una serie di frange chiare e scure. In un superconduttore una singola funzione d'onda descrive tutte le coppie di Cooper. Le funzioni d'onda alle due giunzioni Josephson interferiscono l'una con l'altra e producono le oscillazioni di corrente e di tensione. In pratica si possono rilevare variazioni inferiori a un quanto di flusso. Un minuscolo segnale di flusso produce una corrispondente oscillazione di tensione attraverso lo SQUID, misurabile anche con elettroniche convenzionali.

flusso nello SQUID. Con un trasformatore di flusso lo SQUID può raggiungere una risoluzione dell'ordine del femtotesla (10^{-15} tesla). Un femtotesla corrisponde a una parte su 10^{11} del campo magnetico terrestre.

Un'altra versione del magnetometro SQUID è il gradiometro, un dispositivo che misura la differenza tra i valori del campo magnetico in due punti diversi, ossia il gradiente del campo. Il gradiometro si basa su due trasformatori di flusso avvolti in senso opposto. Una tecnica alternativa impiega due magnetometri SQUID posti a breve distanza l'uno dall'altro e un circuito elettronico che, sottraendo un'uscita dall'altra, determina la variazione di campo su quella distanza. Questo metodo è particolarmente valido quando è applicato a grandi schiere di magnetometri. Una variante escogitata da Roger H. Koch e colleghi del Thomas J. Watson Research Center dell'IBM è il «gradiometro a tre SQUID», nel quale l'uscita di un canale del magnetometro cancella il rumore magnetico in corrispondenza degli altri due, creando così per il gradiometro un ambiente privo di disturbi.

Lo SQUID in corrente continua fatto di materiale superconduttore convenzionale funziona tipicamente in elio liquido. Nella configurazione più diffusa il dispositivo consiste di diversi strati di film sottile (*disegno*) in una «vaschetta» quadrata di niobio. Le giunzioni Josephson si trovano ai lati della fenditura sul margine destro della vaschetta. Una bobina di filo di niobio a 20 avvolgimenti è sistemata su uno strato isolante; i due cavi in alto nella fotografia servono per il collegamento esterno.

La misurazione dei gradienti di campo magnetico è molto importante soprattutto in diagnostica medica: le correnti elettriche presenti nell'organismo sono una ricca sorgente di segnali magnetici che variano nel tempo. Questi piccoli segnali magnetici vanno da alcuni femtotesla nel cervello a 50 000 femtotesla nel cuore. Prima della messa a punto degli SQUID, segnali simili erano troppo deboli per essere studiati. Inoltre le fluttuazioni del campo magnetico terrestre e il rumore magnetico dovuto agli ascensori e agli autoveicoli in movimento e, in particolar modo, al ronzio prodotto dal sistema di distribuzione dell'energia elettrica coprono i segnali magnetici del corpo umano. Il gradiometro SQUID attenua il rumore di fondo perché queste sorgenti sono in genere lontane dal paziente e tendono a essere quasi uniformi. Pertanto esse provocano solo una debole risposta nel gradiometro SQUID, che è sensibile a campi non uniformi.

Nella pratica, una schiera di sensori SQUID rileva la variazione spaziale dei campi magnetici prodotti dal corpo. A partire da questa mappa un calcolatore può ricostruire la regione dell'organismo che produce i segnali. Questa tecnica è del tutto non invasiva. Negli ultimi 20 anni, il numero di SQUID per schiera è passato da circa sette a più di 100; di recente il Superconducting Sensor Laboratory di Inzai Chiba, in Giappone, ha annunciato un sistema prototipo costituito da 250 canali.

Questi strumenti forniscono ai medici informazioni essenziali su varie malattie. Per esempio, in pazienti affetti da epilessia focale, una scarica elettrica relativamente localizzata nel cervello scatena una crisi. La mappatura dei picchi del campo magnetico da parte di una schiera di SQUID può evidenziare la sorgente della scarica. Se la si sovrappone a un'immagine ottenuta tramite risonanza magnetica, questa sorgente può essere correlata con qualche anomalia, come un tessuto cicatriziale. In circostanze favorevoli, il chirurgo può asportarlo oppure distruggerlo con un «bisturi gamma», un fascio collimato di raggi gamma. Un'altra tecnica è quella di suscitare una risposta magnetica per mezzo di specifici stimoli. Per esempio, a

Gli strumenti basati sullo SQUID hanno solitamente bisogno di componenti ausiliari. Un magnetometro include un «trasformatore di flusso», che consiste di un circuito di rivelazione connesso alla bobina di ingresso dello SQUID. Quando viene applicato un campo magnetico, si sviluppa nell'anello una corrente persistente che, scorrendo nella bobina di ingresso, produce un flusso nello SQUID. In un gradiometro vi sono due circuiti di rivelazione avvolti in direzioni opposte per misurare simultaneamente il campo magnetico in luoghi diversi. Nello SQUID si produce un flusso solo se il campo nei due punti non ha lo stesso valore. In un voltmetro a SQUID, una tensione applicata ai terminali di ingresso produce una corrente uguale a questa tensione divisa per il valore del resistore connesso alla bobina d'ingresso dello SQUID.

San Diego, Eugene C. Hirschkoff della Biomagnetic Technologies e Christopher C. Gallen dello Scripps Research Institute usano un sistema SQUID a 74 canali per mappare la risposta alla stimolazione tattile della corteccia circostante un tumore del cervello.

Un altro tipo di applicazione medica di largo interesse riguarda il cuore. L'aritmia cardiaca è provocata da anomalie nelle vie di conduzione elettrica che collegano gli atrî con i ventricoli e, nei casi più seri, può provocare la morte del paziente. Per trattare questa sindrome con una stimolazione elettrica mediante catetere, occorre localizzare le vie anomale, il che può a volte comportare una ricerca prolungata con uno o più cateteri. Vari gruppi, fra cui quello di Gerhard Stroink della Dalhousie University di Halifax e ricercatori della Siemens di Erlangen e dell'Università di Erlangen-Nürnberg, hanno dimostrato che il sistema di visualizzazione SQUID può ridurre drasticamente il tempo necessario per trovare l'anomalia.

Nonostante gli ottimi risultati ottenuti nel campo delle misurazioni biomagnetiche, l'alto costo dei dispositivi a più canali ha impedito una loro ampia diffusione. Eppure questa tecnologia potrebbe ridurre drasticamente il costo delle terapie. Per esempio, la localizzazione di un focus epilettico richiede con gli SQUID circa tre ore, mentre con il metodo alternativo di impiantare elettrodi sulla superficie del cervello può occorrere anche più di una settimana. Per fare un altro esempio, la rimozione di un tumore cerebrale localizzato con precisione riduce le menomazioni funzionali, consentendo un recupero più completo del paziente. Negli Stati Uniti le compagnie di assicurazione hanno già iniziato a rimborsare i costi delle misurazioni biomagnetiche.

Oltre alle applicazioni mediche sono molti i campi in cui gli SQUID hanno un ruolo importante, sia nella ricerca di base sia nelle misurazioni tradizionali. Recentemente, tramite uno SQUID si è stabilito un limite superiore per la massa del fotone (ammesso che ne abbia una). I dati indicano che la massa del fotone deve essere inferiore a circa 10^{-46} grammi: il limite più stretto finora stabilito in un esperimento criogenico di laboratorio.

Gli SQUID sono impiegati anche nel tentativo di rivelare onde gravitazionali. Secondo la teoria della relatività queste onde dovrebbero pervadere l'universo, dato che il collasso di stelle, i buchi neri e il movimento di corpi celesti massicci dovrebbero fare increspare lo spazio in tutte le direzioni. Si sta cercando di captare queste perturbazioni mediante gigantesche barre di metallo, tipicamente di cinque tonnellate di peso e raffreddate a elio liquido, che dovrebbero subire minuscole oscillazioni longitudinali in seguito al passaggio di un'onda gravitazionale. Uno spostamento all'estremità della barra viene rivelato come variazione di flusso in uno SQUID con una risoluzione di 10^{-18} metri, ossia circa 0,001 volte il diametro di un nucleo atomico. Benché siano molte le antenne per onde gravitazionali installate in tutto il mondo, finora non si sono avuti risultati. Forse ci saranno maggiori probabilità con la prossima generazione di antenne aventi una sensibilità di circa due ordini di grandezza più elevata.

Forse il sistema più diffuso basato sugli SQUID è il «suscettometro», uno strumento molto raffinato prodotto dalla Quantum Design di San Diego, che misura le proprietà magnetiche di campioni dalla temperatura di qualche kelvin fino a oltre la temperatura ambiente. Centinaia di questi dispositivi si trovano oggi in laboratori di fisica, chimica, scienza dei materiali e biologia.

Benché gli SQUID abbiano dimostrato la propria utilità già da molti anni, l'interesse nei loro confronti è esploso di recente, grazie a J. Georg Bednorz e K. Alexander Müller dei Laboratori di ricerca IBM di Zurigo, i quali hanno scoperto i cosiddetti superconduttori ad alta temperatura (un risultato che ha fatto loro prontamente assegnare il quarto dei premi Nobel conferiti per ricerche sulla superconduttività). Altri ricercatori hanno poi in breve tempo portato la temperatura di transizione sopra i 100 kelvin.

I mezzi di comunicazione hanno presentato l'evento come la maggiore rivoluzione scientifica dall'invenzione del transistore (se non addirittura da quella della lampada a incandescenza). Il clamore suscitato faceva prevedere un su-

bitaneo giro d'affari di parecchi miliardi di dollari. Naturalmente, come per tutte le innovazioni scientifiche, il progresso richiede tempo. Attualmente gli unici dispositivi basati su questa conquista che siano disponibili in commercio sono gli SQUID.

Diversamente dalla maggior parte dei superconduttori tradizionali, quelli ad alta temperatura sono ceramici e hanno una struttura organizzata in complesse stratificazioni. Almeno per quanto riguarda gli SQUID, il materiale più comune è un ossido di ittrio, bario e rame, di formula chimica $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, dove x è circa 0,15. La sostanza, denominata YBCO, ha una temperatura di transizione di circa 90 kelvin, cosicché diventa un superconduttore alla temperatura dell'azoto liquido.

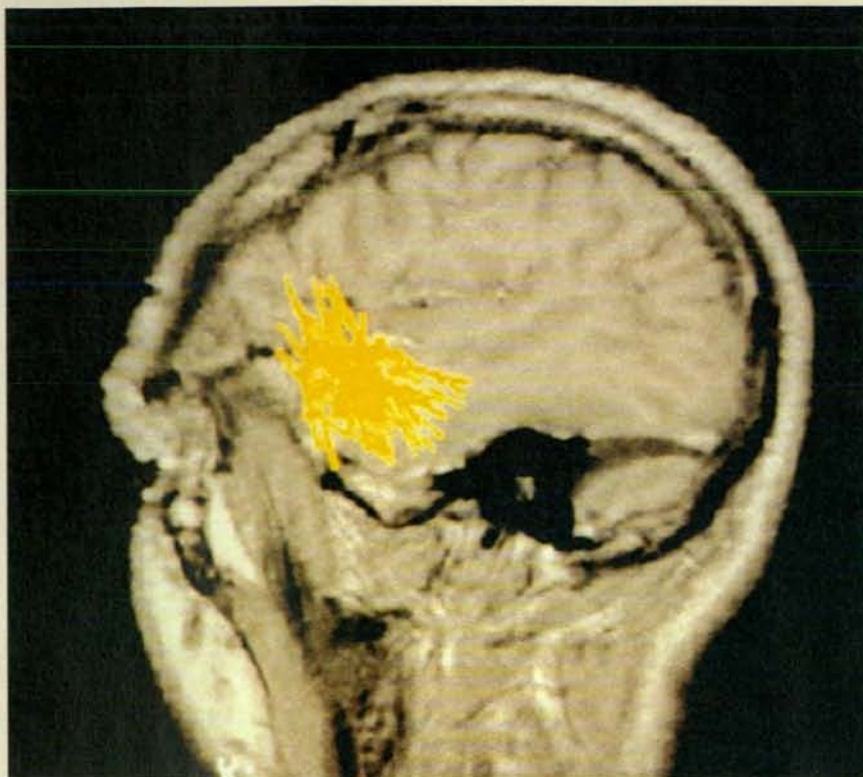
Essendo ceramici, i nuovi superconduttori sono fragili e difficili da lavorare. Non è possibile piegarli facilmente e dar loro forma come si fa invece con i superconduttori a bassa temperatura, che sono relativamente duttili. Si sono quindi ideati vari metodi per ottenere film sottili di alta qualità. Tra questi, la deposizione tramite un laser a eccimeri impulsato di alta potenza si è dimostrata molto valida, se non altro perché è un processo relativamente rapido. Gli impulsi laser, che ricadono nella regione ultravioletta dello spettro elettromagnetico e hanno una lunghezza d'onda tipica di 248 nanometri, colpiscono un bersaglio rotante di YBCO montato in una camera contenente ossigeno. Ogni impulso vaporizza una piccola quantità di YBCO, formando un bel pennacchio di colore rosa. Il materiale si raccoglie su un vicino substrato tenuto a una temperatura di circa 800 gradi Celsius. Il film cresce per epitassia - in altre parole, la sua struttura cristallina imita quella del substrato - con la corretta composizione chimica.

Oltre a foggiare gli SQUID in film sottili, i produttori devono anche riuscire a disporre sul wafer le giunzioni Josephson. Sono stati messi a punto raffinati processi per foggiarle in superconduttori ad alta temperatura. Duane Dimos e collaboratori del Thomas J. Watson Research Center hanno sviluppato un metodo particolarmente riuscito. Si parte con un cristallo, in genere di titanato di stronzio, che è stato tagliato e fuso per ottenere una deliberata disorientazione dei suoi assi lungo una linea. Quando il film di YBCO viene fatto crescere per epitassia, esso riproduce il brusco cambiamento nell'orientazione cristallina del substrato. La dislocazione degli assi ha l'effetto di ridurre la capacità dell'YBCO di trasportare la supercorrente, comportandosi come una giunzione Josephson. Un altro metodo efficiente per produrre giunzioni si basa su un sandwich epitassiale, per realizzare il quale si interpone tra due superconduttori un sottile strato di materiale normale.

Come si fa con le loro controparti a bassa temperatura, per gli SQUID ad alta temperatura si ricorre a un trasformatore di flusso per migliorare la sensibilità ai campi magnetici. Un metodo assai semplice è quello di formare il trasformatore di flusso nello stesso strato di YBCO dove si prepara lo SQUID. Un secondo trasformatore di flusso può accrescere ancora la sensibilità. Con il più recente di questi progetti, Dieter Koelle e collaboratori dell'Università della California a Berkeley, del Lawrence Berkeley Laboratory e della Conductus, Inc., di Sunnyvale in California hanno ottenuto un livello di rumore di circa 30 femtotesla. Michael Mück e colleghi del Centro di ricerche Jülich in Germania sono arrivati a 24 femtotesla con un trasformatore analogo accoppiato a uno SQUID a radiofrequenza.

Va sottolineato come gli SQUID che funzionano in azoto liquido non possano comunque raggiungere una risoluzione elevata quanto le loro controparti che operano in elio liquido. Allora perché i dispositivi ad alta temperatura suscitano tanto scalpore? Come disse scherzosamente molti anni fa il premio Nobel Ivar Giaever, ora al Rensselaer Polytechnic Institute, l'elio liquido è costoso quanto lo Scotch, mentre l'azoto liquido è economico come il latte.

Anche se questa affermazione non corrisponde del tutto alla realtà, il nocciolo della questione è che l'azoto liqui-

Questa immagine di George Washington è stata ottenuta per scansione di una banconota da un dollaro mediante uno SQUID ad alta temperatura. Durante la scansione lo SQUID rileva le variazioni del campo magnetico dovute alle particelle d'inchiostro.

L'epilessia focale può essere provocata da una anomalia neuronale localizzata che produce segnali magnetici nel cervello. Una schiera di SQUID misura questi segnali permettendo di dedurre la posizione del focus epilettico (*area in giallo*); questa può essere poi sovrapposta a una immagine ottenuta per risonanza magnetica.

do vaporizza molto più lentamente dell'elio liquido. Invece di dover riempire un dewar di elio liquido ogni due o tre giorni, se ne riempie uno di azoto liquido ogni due o tre settimane. Inoltre l'elio liquido è ampiamente disponibile solo nelle maggiori aree metropolitane; altrove esso è una sostanza esotica che non ci si può procurare facilmente da un giorno all'altro. Il raffreddamento ad azoto liquido rende così disponibile una tecnologia dei superconduttori che altrimenti verrebbe scartata.

La potenzialità sempre crescente degli SQUID ad alta temperatura è in particolar modo evidente nella ricerca geofisica, che spesso viene condotta in luoghi inaccessibili. Una di queste applicazioni è la magnetotellurica, un metodo che misura la resistività elettrica del suolo al di sotto della superficie allo scopo di desumere la struttura sottostante. In poche parole, onde elettromagnetiche a bassissima frequenza (da 0,001 a 100 hertz) provenienti dall'alta atmosfera e generate dal vento solare si propagano fino alla superficie terrestre dove vengono riflesse. Una parte di queste onde, però, attraversa la superficie. Misurando i minuscoli campi magnetici ed elettrici fluttuanti, rispettivamente per mezzo di magnetometri e di elettrodi sepolti, è possibile cartografare la resistività della crosta terrestre a profondità di parecchie decine di chilometri. Da questi dati si può risalire alle caratteristiche idrologiche e strutturali del sottosuolo e giungere all'individuazione di indizi validi sull'eventuale presenza di giacimenti petroliferi o di fonti di energia geotermica. Mediante tecniche complementari, si possono inviare impulsi magnetici e misurare la risposta. I metodi a impulsi sono largamente usati nella trivellazione per la ricerca petrolifera e anche per localizzare rifiuti pericolosi nel sottosuolo.

La facilità d'uso garantita dall'azoto liquido incoraggerà verosimilmente la proliferazione dei sistemi SQUID in medicina. Già parecchi gruppi di ricerca utilizzano SQUID ad alta temperatura per ottenere magnetocardiogrammi e perfino magnetoencefalogrammi. Un'estensione interessante di questa tecnologia potrebbe riguardare la cardiologia fetale. Il controllo del ritmo cardiaco è il modo più comune con cui i medici accertano la salute del feto, ma gli elettrocardiogrammi possono essere fatti solo fino al settimo od ottavo mese di gravidanza. In seguito il segnale diminuisce perché il feto diventa elettricamente isolato dalla madre. Questo però non ha alcun effetto sui magnetocardiogrammi. Inoltre, la maggiore risoluzione spaziale delle misurazioni magnetiche rende più facile distinguere il segnale fetale da quello materno.

Si è cominciato a ottenere immagini magnetiche facendo scorrere lo SQUID su un oggetto. Un «microscopio a scansione SQUID» di questo tipo è in grado di risolvere oggetti delle dimensioni di qualche micrometro. Questa tecnica trova applicazioni nello studio non solo di materiali magnetici, ma anche di metalli e circuiti elettronici, che producono campi magnetici quando vi fluisce una corrente. Si stanno anche esplorando le possibilità d'impiego degli SQUID in prove non distruttive, come per esempio nel controllo della corrosione nelle lamine di alluminio rivettate di un aereo. Lo SQUID misura l'influenza del rivestimento dell'aereo su un campo magnetico oscillante applicato; una variazione di conduttività elettrica rivela la presenza di difetti.

In questo momento, il più sofisticato SQUID ad alta temperatura disponibile in commercio è «iMAG», una versione di magnetometro YBCO a strato singolo. Prodotto dalla Conductus, è un sistema completo di elettronica, dewar e sonda e viene venduto a circa 10 000 dollari. Estremamente versatile, questo strumento è adatto sia per esperimenti di laboratorio sia per studi di geofisica e di magnetocardiologia.

Sicuramente, questi SQUID non potranno rimpiazzare in ogni situazione i loro cugini a bassa temperatura. I rivelatori di onde gravitazionali e altre applicazioni che esigono prestazioni di alto livello continueranno ad aver bisogno dell'elio liquido. I dispositivi basati sull'azoto liquido apriranno comunque una gamma di possibilità che in precedenza non erano realistiche e porteranno questa tecnologia meravigliosamente sensibile fuori dai laboratori e dagli ospedali all'avanguardia e verso mercati più ampi.

BIBLIOGRAFIA

RYHÄNEN T., SEPPÄ H., ILMONIEMI R. e KNUUTILA J., *SQUID Magnetometers for Low-Frequency Applications* in «Journal of Low Temperature Physics», 76, n. 5-6, settembre 1989.

BARONE A. (a cura), *Principles and Applications of Superconducting Quantum Interference Devices*, World Scientific Publishing, 1992.

CLARKE JOHN, *SQUIDs: Theory and Practice* in *The New Superconducting Electronics*, a cura di H. Weinstock e R. W. Ralston, Kluwer Academic Publishers, 1993.

GALLEN CHRISTOPHER C. e BLOOM FLOYD E., *Mapping the Brain with MSI* in «Current Biology», 3, n. 8, agosto 1993.

STROINK GERHARD, *Cardiomagnetic Imaging* in *Frontiers in Cardiovascular Imaging*, a cura di B. L. Zaret, L. Kaufman e altri, Raven Press, 1993.

Le maree rosse

Molti esperti ritengono che queste devastanti fioriture di alghe tossiche siano divenute più frequenti e cospicue negli ultimi decenni costituendo una grave minaccia per la salute dell'uomo e degli organismi marini

di Donald M. Anderson

Sul finire del 1987 gli scienziati si trovarono ad affrontare una serie sconcertante di catastrofi marine. Per prima cosa, 14 megattere morirono nella baia di Cape Cod, sulla costa del Massachusetts, nell'arco di tempo di cinque settimane. Questa morìa, equivalente a 50 anni di mortalità «naturale» non era dovuta al fenomeno dello spiaggiamento: non era accaduto cioè che esemplari in buona salute fossero andati ad arenarsi sulla riva. I cetacei erano morti in mare, alcuni rapidamente, e solo successivamente erano stati buttati sulla spiaggia dai flutti. Gli esami effettuati *post mortem* indicavano che le balenottere stavano bene fino a poco prima del decesso; inoltre il contenuto gastrico di questi animali comprendeva un'abbondante quantità di meduse e pesci, a riprova di un pasto recente. Allarmate e costernate, stampa e opinione pubblica attribuirono queste morti misteriose all'inquinamento o a qualche riversamento di sostanze chimiche velenose.

Altri due avvelenamenti di massa si verificarono in quello stesso mese, ma le vittime, in questi nuovi casi, furono esseri umani. Pescatori e bagnanti che avevano frequentato la costa del North Carolina iniziarono a lamentare problemi respiratori e di irritazione agli occhi. In capo a pochi giorni, residenti e turisti che avevano mangiato molluschi locali sperimentarono diarree, capogiri e altri sintomi che inducevano a pensare a un avvelenamento con qualche sostanza tossica per il sistema nervoso. Queste manifestazioni misero gli epidemiologi in stato di massima allerta e indussero a sospettare perfino che un sommergibile affondato stesse perdendo gas velenosi.

In concomitanza con questi fatti, alcuni ospedali canadesi cominciarono a ricoverare pazienti che manifestavano disorientamento, vomito, diarrea e crampi addominali. Tutti avevano mangiato mitili provenienti dall'Isola Prince Edward. Sebbene le autorità sanitarie canadesi avessero una buona esperienza in fatto di intossicazioni da molluschi (molti erano stati gli episodi nei decenni precedenti), questi sintomi erano poco familiari e particolarmente inquietanti: alcuni pazienti mostravano un danno permanente della memoria a breve termine. Essi erano in grado di ricordare, per esempio, il proprio indirizzo, ma non ciò che avevano mangiato l'ultima volta. Le autorità applicarono immediatamente restrizioni alla vendita e alla distribuzione dei mitili, ma si dovettero comunque registrare tre decessi e 105 casi di intossicazione acuta.

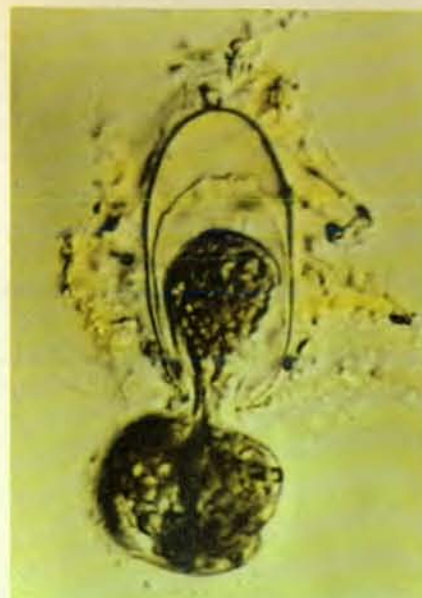
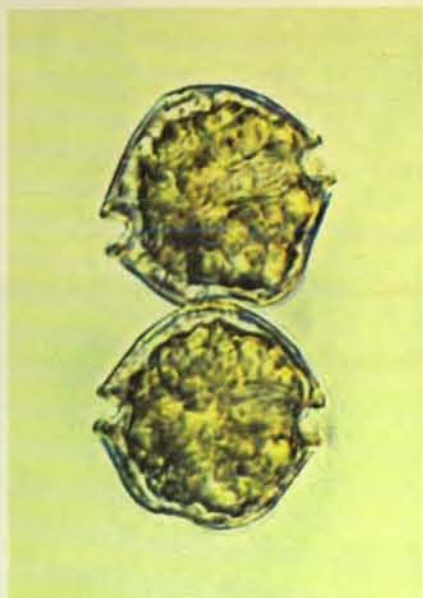
Ora sappiamo che questi eventi, apparentemente privi di relazione, furono tutti causati, direttamente o indirettamente, da alghe tossiche unicellulari, facenti parte del cosiddetto fitoplancton. Alle estese fioriture di queste alghe si dà talvolta il nome di «maree rosse». Sebbene le maree rosse siano un fenomeno noto da sempre, gli incidenti che abbiamo menzionato erano completamente inattesi e imprevedibili. Come vedremo, questi fatti sono solo alcuni esempi di un problema più vasto e grave che ha cominciato ad attirare l'attenzione della comunità scientifica e delle autorità legislative.

Di fatto, vi è la convinzione tra molti esperti che la dimensione e la complessità di questo fenomeno naturale vadano crescendo. Si è osservato che il numero di fioriture tossiche, le perdite economiche che da esse derivano, i tipi di risorse colpite, le varietà di tossine e il numero di specie algali velenose sono tutti parametri che hanno subito un incremento. Questa espansione è dunque un fatto reale? Si tratta di un'epidemia globale, come qualcuno ha sostenuto? Si tratta di fenomeni che devono essere posti in relazione alle attività umane, come il crescente inquinamento costiero? Oppure si tratta solo del risultato di una maggiore consapevolezza scientifica e del miglioramento degli strumenti di sorveglianza e di analisi? Per rivolgerci a questi problemi, dobbiamo comprendere la natura dei meccanismi fisiologici, tossicologici ed ecologici che sono alla base della crescita e della proliferazione delle alghe che causano le maree rosse, nonché il modo in cui esse possono danneggiare gli organismi.

Certe fioriture algali sono chiamate maree rosse quando le minuscole alghe pigmentate proliferano al punto da far assumere all'acqua di mare un colore rosso, bruno e persino verde. Il nome è fuorviante, comunque, dal momento che molti eventi tossici assumono il nome di maree rosse anche quando le acque non presentano mutamento di colore. Viceversa, un accumulo di alghe innocue, non tossiche, può cambiare il colore dell'acqua di mare. Il quadro è ancora più complicato: alcuni tipi di fitoplancton non cambiano il colore delle acque e neppure producono tossine; nondimeno sono in grado di uccidere gli animali marini in altri modi. Molti fenomeni di natura diversa vanno pertanto a ricadere nel capitolo generico «maree rosse».

Delle migliaia di specie viventi fitoplanctoniche che vanno a costituire la base della catena alimentare marina, solo poche decine sono note per essere tossiche. La maggior parte di esse è data da dinoflagellati, prymnesiofite o cloromonadi. Una fioritura si sviluppa quando queste alghe unicellulari fotosintetizzanti si moltiplicano abbondantemente, convertendo le sostanze nutritive sciolte nell'acqua e la luce solare in biomassa vegetale. La modalità predominante di riproduzione è la semplice scissione o divisione asessuata: una cellula aumenta di dimensioni, quindi si divide in due; queste, a loro volta, si dividono diventando quattro e così via. Se non vi è penuria di sostanze nutritive, carenza di luce o consumo particolarmente intenso di alghe da parte dello zooplancton, la dimensione della popolazione algale può crescere rapidamente. In alcuni casi, un solo millilitro di acqua marina può contenere decine o centinaia di migliaia di cellule algali. Quando una popolazione si espande su vaste aree, l'effetto, oltre che catastrofico, può essere veramente spettacolare.

Alcune specie, quando vi è penuria di sostanze nutritive, fanno ricorso alla riproduzione sessuale. Esse formano cellule quiescenti a parete spessa - le cosiddette cisti - che si depositano sul fondo marino dove possono sopravvivere anche per anni. Quando le condizioni si

Le maree rosse si formano quando le alghe pigmentate proliferano e danno luogo a estese fioriture. Perfino specie non tossiche, come *Noctiluca*, di cui è qui mostrata una fioritura in un porto giapponese, possono distruggere la fauna marina, in quanto consumano tutto l'ossigeno delle acque superficiali.

Il ciclo vitale di molte specie di alghe tossiche consente loro di sopravvivere anche per anni in condizioni ambientali avverse. Quando le sostanze nutritive sono scarse, le alghe formano cisti quiescenti dalle pareti cellulari ispessite (*a sinistra*). Le cisti spesso vengono trasportate passivamente in nuove acque. Quando si ripristinano le condizioni favorevoli alla loro crescita, le cisti germinano (*al centro*) e vanno a colonizzare aree in precedenza indenni da organismi dannosi (*a destra*).

fanno di nuovo favorevoli per la crescita, le cisti germinano e reintroducono nelle acque cellule natanti in grado di dare origine a una nuova fioritura. Sebbene non tutte le specie implicate nelle maree rosse abbiano la capacità di formare cisti, molte presentano questa caratteristica, il che spiega molti aspetti della loro ecologia e della loro distribuzione biogeografica. Il tempo e il luogo di una fioritura possono dipendere dal momento in cui avviene la germinazione delle cisti e dalla località in cui esse erano state depositate. La produzione di cisti facilita anche la dispersione delle specie: le fioriture trasportate in nuove acque a opera delle correnti o con altre modalità possono depositare i «semi» di popolazioni che colonizzeranno aree in precedenza indenni.

Un esempio drammatico di dispersione naturale si ebbe nel 1972, quando una grande marea rossa che si estendeva dal Maine al Massachusetts si formò subito dopo un uragano di fine estate. La tossicità dei molluschi, rilevata in quell'occasione per la prima volta, si ripresentò in seguito quasi ogni anno, per un paio di decenni. Lo stadio di quiescenza allo stato di cisti si è rivelato molto efficace anche per la sopravvivenza e la dispersione di molte altre specie implicate nelle maree rosse.

Ma in che modo le fioriture algali danneggiano gli organismi? Uno dei più gravi effetti sulla vita umana e marina si verifica quando ostriche, mitili e altri molluschi bivalvi ingeriscono le alghe come cibo e accumulano le tossine nei loro tessuti. Di solito questi animali risentono di effetti solo marginali, ma un singolo mollusco può talvolta accumulare una quantità di tossina sufficiente per uccidere una persona. Queste sindromi di intossicazione da molluschi sono state descritte, in base alla tipologia dei sintomi, come paralitiche, diarroiche e neurotossiche (rispettivamente abbreviate in PSP, DSP, NSP, dove l'ultima P deriva da *poisoning*, intossicazione). L'episodio canadese del 1987 in seguito al quale alcuni intossicati manifestarono perdita della memoria fu appropriatamente classificato come sindrome amnesica (ASP). L'episodio del North Carolina fu di tipo NSP.

Un problema correlato, la cosiddetta *ciguatera*, sindrome di intossicazione da pesce (CFP, *ciguatera fish poisoning*) causa più danni di carattere sanitario di ogni altro tipo di tossicità di origine marina. Si verifica in misura predominante nelle isole tropicali e subtropicali, dove colpisce ogni anno da 10 000 a 50 000 persone. I dinoflagellati, che vivono attaccati alle piante marine, producono le tossine che causano la ciguatera (ciguatossine). I pesci erbivori ingeriscono queste piante e con esse i dinoflagellati. Dato che le ciguatossine sono solubili nei grassi, esse vengono immagazzinate nei tessuti dei pesci e viaggiano attraverso la catena alimentare fino a essere ingerite dai carnivori. I pesci più pericolosi dal punto di vista alimentare risultano alla fine quelli più grossi e vecchi, che di solito sono anche i più apprezzati.

I sintomi variano molto da un tipo all'altro di sindrome, ma sono generalmente di natura neurologica e gastrointestinale, o entrambe. La DSP causa diarrea, nausea e vomito, mentre i sintomi PSP comprendono formicolii e intorpidimento della bocca, delle labbra e delle dita, accompagnati da debolezza muscolare generalizzata. Una dose particolarmente forte impedisce la respirazione e talvolta l'esito è fatale per paralisi respiratoria. La NSP provoca diarrea, vomito e dolori addominali, seguiti da dolori muscolari, disorientamento, ansietà, sudorazione e formicolii periferici. I sintomi della ciguatera sono pressoché identici a quelli NSP.

I disturbi e i decessi causati da queste intossicazioni variano qualitativamente e quantitativamente da un anno all'altro e da una località all'altra. Le fluttuazioni ambientali influenzano profondamente la crescita e l'accumulo di alghe e quindi la loro tossicità. Inoltre, nei diversi paesi si riscontra una differente capacità di tenere sotto controllo i molluschi e di rilevare la presenza di biotossine prima che raggiungano il mercato. Nei paesi sviluppati sono di solito operativi programmi di monitoraggio che consentono il blocco temporaneo di prodotti contaminati. Malesseri e decessi sono pertanto rari, a meno che non sopravvenga una nuova tossina (come nella crisi ASP in Canada) o la fioritura colpisca un'area dove non si abbiano esperienze pregresse del problema (come nel North Carolina). I paesi in via di sviluppo, specialmente quelli che hanno un notevole sviluppo costiero o popolazioni povere che dipendono principalmente dal mare per la loro alimentazione, possono incorrere con maggiore facilità nei danni alla salute provocati dalle fioriture algali.

Il fitoplancton può anche uccidere gli animali marini direttamente. Nel Golfo del Messico, il dinoflagellato *Gymnodinium breve* provoca di frequente devastanti morie di pesci. Quando i pesci attraversano una fioritura di *G. breve*, le fragili alghe si rompono, liberando neurotossine che raggiungono le branchie dei pesci. In breve tempo questi muoiono per asfissia. Tonnellate di pesci morti coprono talvolta le spiagge lungo la costa della Florida, causando milioni di dollari di danni al turismo e ad altre attività di carattere ricreativo.

I pesci d'allevamento sono particolarmente vulnerabili, in quanto gli animali racchiusi in recinzioni non sono in grado di evitare le fioriture. Ogni anno, il salmone e altre specie di importanza economica sono vittime di svariate specie di alghe tossiche. Le fioriture possono spazzare via interi allevamenti ittici nel giro di ore, uccidendo pesci di ogni taglia. Le proliferazioni algali costituiscono pertanto una grave minaccia per gli allevamenti e per le società assicuratrici. In Norvegia è in corso un programma a vasto raggio per contenere al minimo danni di questo genere. Gli allevatori di pesce effettuano rilevamenti settimanali della concentrazione delle alghe e della limpidezza delle acque. Altri parametri vengono trasmessi a riva da strumenti collocati su boe ormeggiate al largo. Il Ministero norvegese dell'ambiente combina poi queste informazioni con previsioni meteorologiche valide per cinque giorni, così da emanare «previsioni algali» a uso degli allevatori e delle autorità sanitarie. Le recinzioni dei pesci in immediato pericolo vengono quindi trainate verso acque più sicure.

Sfortunatamente, si può fare poco di più. Le modalità attraverso cui le alghe provocano la morte dei pesci sono ancora poco chiare. Alcune specie fitoplanctoniche producono acidi grassi polinsaturi e galattolipidi che distruggono le cellule del sangue. Un effetto del genere spiegherebbe la rottura delle branchie, l'ipossia e l'edema che si osservano nei pesci morenti. Altre specie algali producono, oltre a questi composti emolitici, anche neurotossine. Questa micidiale combinazione può rallentare notevolmente il battito cardiaco del pesce, facendo precipitare il flusso sanguigno fino a provocare la morte dell'animale per mancanza di ossigeno.

Inoltre, anche il fitoplancton che non produce tossine può essere letale per i pesci. Il genere di diatomee *Chaetoceros* è stato implicato in una moria di salmoni verificatasi nel Puget Sound, nello Stato di Washington, ma non è stata identificata alcuna tossina che fosse prodotta da queste alghe. Si è però osservato che alcune specie di questo genere, per esempio, *C. convolutus*, sono dotate di lunghe spine uncinate che si impigliano nei tessuti branchiali e provocano la secrezione di grandi quantità di muco. La continua irritazione esaurisce la riserva di muco e le cellule che lo producono, causando degenerazione delle lamelle branchiali e morte per ridotto scambio di ossigeno. Queste spine uncinate non si sono probabilmente evolute allo scopo di uccidere i pesci, dal momento che solo quelli degli allevamenti soccombono in seguito a fioriture di questo genere. Il problema che devono affrontare i proprietari degli allevamenti è molto più probabilmente lo sfortunato risultato di una strategia evolutiva messa in atto da certe specie di *Chaetoceros* per difendersi dai predatori, o forse solo per migliorare la capacità di galleggiamento.

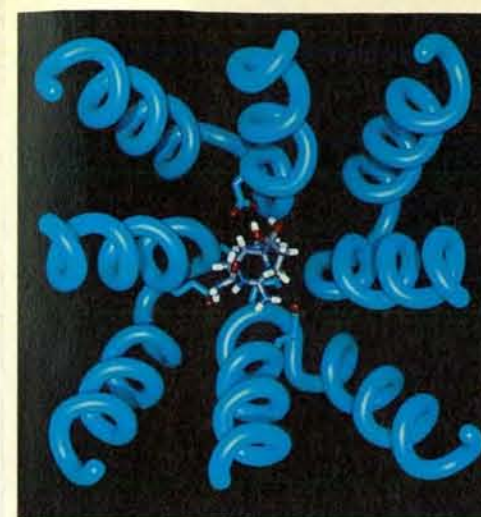
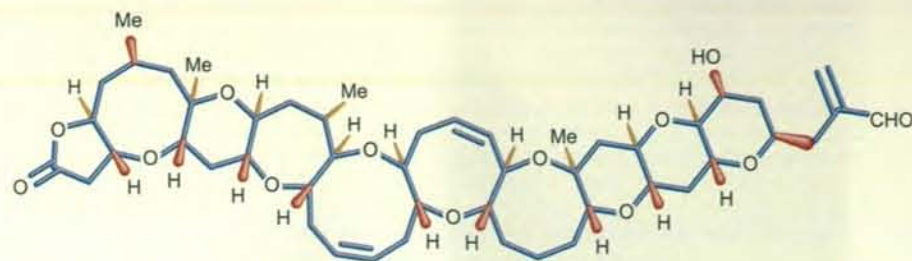
Le tossine algali causano avvelenamenti mortali anche muovendosi attraverso la catena alimentare marina. Alcuni anni fa ci fu una moria di tonnellate di aringhe nella Baia di Fundy dovuta al fatto che esse avevano ingerito piccoli molluschi planctonici che, a loro volta, si erano nutriti del dinoflagellato del genere *Alexandrium*, che produce tossina PSP. Dal punto di vista della salute umana è una fortuna che aringhe, merluzzi, salmoni e altre specie di interesse commerciale siano sensibili a queste tossine e che, a differenza dei molluschi, questi animali muoiano prima che la tossina raggiunga nelle loro carni concentrazioni pericolose per la salute dell'uomo. Alcune tossine, comunque, si accumulano nel fegato e in altri organi di certi pesci, cosicché gli animali (altri pesci, mammiferi marini, uccelli) che li consumano interi corrono gravi rischi.

Siamo ora in grado di ricostruire gli eventi che condussero alla morìa di megattere del 1987. Poche settimane di intense indagini condotte in quell'anno dal patologo marino Joseph R. Geraci dell'Ontario Veterinary College, dal sottoscritto e da molti altri, rivelarono che con ogni probabilità erano state tossine PSP a provocare quelle morti. Il dinoflagellato *Alexandrium tamarense* aveva prodotto la tossina, che aveva raggiunto i cetacei attraverso la catena alimentare. Analizzando gli sgombri di cui le balenottere si erano nutrite, individuammo la saxitossina non nella loro carne, ma concentrata nel fegato e nei reni. Presumibilmente gli sgombri si erano nutriti di zooplancton e di piccoli pesci che, a loro volta, avevano in precedenza ingerito *Alexandrium*.

Le balenottere stavano apprestandosi alla loro migrazione stagionale verso sud e pertanto si nutrivano abbondantemente. Stimando che esse consumassero quotidianamente una quantità di cibo pari al quattro per cento della loro massa corporea, abbiamo calcolato che dovevano aver introdotto saxitossina in misura pari a 3,2 microgrammi per chilogrammo di massa corporea. Possibile che si trattasse di una dose letale? Sfortunatamente nel 1987 non eravamo in possesso di dati che indicassero direttamente la quantità di tossina necessaria per uccidere una megattera. Sapevamo che la dose letale minima di saxitossina per un essere umano va da 7 a 16 microgrammi per chilogrammo di peso, ma si trattava di

Nel 1987 ben 14 megattere morirono improvvisamente nella baia di Cape Cod, nel Massachusetts, per esposizione a una fioritura di *Alexandrium tamarense*. Si scoprì in seguito che questi cetacei si erano nutriti di sgombri i cui organi contenevano alte concentrazioni di saxitossina, una neurotossina prodotta da questa specie di alghe.

Le tossine delle alghe

La struttura delle tossine coinvolte nelle maree rosse varia notevolmente. Le saxitossine (di cui un esempio viene mostrato a sinistra) presentano combinazioni differenti di H^+, OH^-, e SO_3^- sui siti da R1 a R4, ma tutti i membri di questa famiglia bloccano il canale del sodio e quindi interrompono la comunicazione tra nervi e muscoli. H. Robert Guy, dei National Institutes of Health, ha ipotizzato un modello strutturale che spieghi questa interazione (*a destra*). Lo scheletro di carbonio del canale del sodio è in grigio, i carbossili sono rossi, l'azoto è blu e l'idrogeno bianco. La saxitossina si lega nella regione più stretta di questo canale. Le brevitossine (*esempio al centro*) che causano disturbi di tipo NSP sono molecole molto più grandi che pure vanno ad agire sul canale del sodio.

dosi da due a cinque volte maggiori di quelle che con ogni probabilità erano state ingerite dalle megattere.

I nostri calcoli erano di primo acchito sconfortanti, ma meditandoci sopra ci rendemmo conto che potevano esserci ragioni per cui i cetacei erano più sensibili alle tossine degli esseri umani. In primo luogo, essi avrebbero assorbito dosi di tossina continuativamente, mentre le statistiche sulla mortalità umana si basano su singoli pasti. In secondo luogo, durante un'immersione si verifica nei mammiferi marini un riflesso nervoso che convoglia sangue e ossigeno principalmente al cuore e al cervello. Si tratta dello stesso meccanismo che talvolta protegge i bambini che cadono in acqua per la rottura di un sottile strato di ghiaccio e riescono a sopravvivere in immersione anche per mezz'ora o più. Negli esseri umani questo riflesso si attiva solo in acqua molto fredda, ma nei cetacei entra in gioco durante ogni immersione.

Ogni immersione avrebbe pertanto esposto alla tossina gli organi più sensibili, in quanto avrebbe «scavalcato» fegato e reni, dove avviene l'eliminazione delle sostanze tossiche. Infine, non è detto che la saxitossina abbia ucciso le balenottere direttamente. Anche un animale leggermente danneggiato nelle sue capacità potrebbe avere avuto difficoltà a orientarsi per riguadagnare la superficie o per respirare correttamente. Le megattere potrebbero pertanto avere subìto un'esposizione subletale alla saxitossina. La causa precisa non sarà forse mai appurata, ma sembra altamente probabile che queste magnifiche creature siano morte per l'effetto di una tossina di origine naturale sintetizzata da alghe microscopiche.

Altri esempi di tossine in grado di viaggiare attraverso la catena alimentare si riscontrano quasi annualmente. Nel 1991 furono trovati nei pressi della Baia di Monterey, in California, pellicani e cormorani agonizzanti o morenti. Gli esperti di fauna selvatica non scoprirono segni che facessero pensare all'azione di pesticidi, metalli pesanti o altri inquinanti. Il veterinario incaricato dello studio consultò telefonicamente Jeffrey Wright, del National Research Council Laboratory di Halifax, nella provincia canadese di Nuova Scozia. Wright aveva diretto il Canadian Mussel Toxin Crisis Team, che aveva identificato la sostanza tossica responsabile del misterioso episodio ASP del 1987. Il suo gruppo aveva isolato una tossina dai mitili dell'isola Prince Edward (che era stata chiamata acido domoico) e ne aveva rintracciato l'origine in una diatomea, *Pseudonitzschia pungens*, considerata innocua fino a quel momento. Quattro anni più tardi alcuni membri dello stesso gruppo canadese furono in grado di accertare in tempo brevissimo che gli uccelli intossicatisi in California si erano nutriti di acciughe contenenti acido domoico, sempre proveniente da *Pseudonitzschia* (seppure da una specie diversa).

Le tossine responsabili di queste sindromi non sono singole entità dal punto di vista chimico, bensì famiglie di composti dalle strutture chimiche e dagli effetti simili. Per esempio, le saxitossine che causano PSP sono una famiglia che comprende almeno 18 composti di tossicità molto diversa. La maggior parte delle tossine algali causa disturbi nell'uomo interferendo con la conduzione elettrica, interrompendo la comunicazione tra nervo e muscolo e impedendo alcuni processi fisiologici di importanza critica. Per fare ciò, si legano a specifici recettori di membrana, provocando cambiamenti nella concentrazione intracellulare di ioni come sodio e calcio.

La saxitossina si lega al canale del sodio e blocca il flusso di questo ione sia in ingresso sia in uscita nelle cellule nervose e muscolari. Le brevitossine, la famiglia di nove composti responsabili dei disturbi NSP, si legano a un sito differente sul canale del sodio, ma causano un effetto opposto a quello della saxitossina. L'acido domoico distrugge la normale trasmissione neurochimica nel cervello. Si lega ai recettori del cainato nel sistema nervoso centrale, causando una depolarizzazione protratta dei neuroni che porta a degenerazione cellulare e morte. La perdita di memoria nelle vittime delle intossicazioni ASP sembra derivare da lesioni dell'ippocampo, dove i recettori del cainato abbondano.

Ma per quale motivo le specie algali producono tossine? Alcuni ipotizzano che le tossine facciano parte di una strategia evolutiva di difesa dallo zooplancton e da altri animali che si nutrono di alghe. Di fatto alcune specie che compongono lo zooplancton possono manifestare, quando si nutrono di queste alghe, una lenta diminuzione delle loro attività, come se si paralizzassero gradualmente o subissero altri tipi di danno. (Dopo esposizione a dinoflagellati tossici, per esempio, un ciliato era in grado di nuotare solo all'indietro, allontanandosi quindi dalla preda designata.) Talvolta gli animali risputano le alghe tossiche, si suppone per il loro sapore disgustoso. Questi effetti riducono la predazione e quindi finiscono con il favorire le fioriture. A ogni modo, anche il fitoplancton non tossico dà luogo a estese proliferazioni: è quindi improbabile che le tossine servano solo per «difesa personale».

Si sta ora cercando di comprendere quali siano i processi biochimici necessari alla produzione di queste tossine, ma questa ricerca è stata finora senza esito. Le tossine non sono proteine, e vengono tutte sintetizzate per gradi attraverso un processo che vede coinvolti molti geni. Si sono ipotizzati percorsi biosintetici, ma non si sono ancora isolati intermedi chimici o enzimi che vengano usati solo nella produzione di tossine. È stato quindi difficile applicare i potenti strumenti della biologia molecolare a questi organismi, se non per studiarne i geni o per sviluppare strumenti di rilevamento.

Siamo attualmente in possesso di alcuni indizi enigmatici sul metabolismo delle tossine. Per esempio, ci è noto che certi dinoflagellati producono quantità diverse di tossine e differenti serie di loro derivati quando modifichiamo le condizioni di crescita. Il metabolismo delle tossine è un processo dinamico, ma non siamo ancora in grado di affermare se esse abbiano o meno uno specifico ruolo biochimico. Analogamente al danno, puramente accidentale, che le spine delle diatomee arrecano alle branchie dei pesci, i disturbi e la mortalità causati dalle «tossine» algali potrebbero essere il risultato di un'affinità chimica del tutto accidentale di questi metaboliti per i siti recettoriali presenti sui canali ionici delle membrane degli animali superiori.

Il ruolo potenziale dei batteri o dei geni batterici nella produzione delle tossine del fitoplancton è oggetto di attiva ricerca. Ci chiediamo in che modo un gruppo geneticamente differenziato di organismi, incluso il fitoplancton, le alghe, i batteri e i cianobatteri (si veda l'articolo *Le tossine dei cianobatteri* di Wayne W. Carmichael in «Le Scienze» n. 307, marzo 1994) abbia potuto evolvere i geni necessari a produrre la saxitossina. Molti anni fa, Masaaki Kodama dell'Università Kitasato in Giappone isolò batteri intracellulari da colture di *Alexandrium tamarense* trattate con antibiotici, dimostrando che erano i batteri a produrre saxitossina. Questa scoperta confermava la vecchia ipotesi, a lungo ignorata, che le tossine potessero avere origine da batteri viventi all'interno o alla superficie delle cellule dinoflagellate.

Nonostante studi considerevoli, la questione resta aperta. Molti ricercatori ora ammettono che certi batteri producano saxitossina, ma sottolineano che colture batteriche anche dense ne producono solo quantità estremamente ridotte. Così pure non è certo che questi batteri si possano trovare all'interno dei dinoflagellati. Che i batteri intracellulari producano tutta la tossina che si trova in un dinoflagellato sembra pertanto poco verosimile, ma forse si verifica qualche tipo di sinergia tra un piccolo numero di simbionti e il dinoflagellato che li ospita. Questa sinergia verrebbe meno quando i batteri si trovano isolati in coltura. In alternativa, nella produzione di tossina potrebbe essere coinvolto un gene batterico, o plasmide.

Data la grande varietà di alghe che producono tossine o causano problemi in sistemi oceanografici diversissimi, ogni tentativo di generalizzare la dinamica delle fioriture algali dannose è destinato a fallire. Molte specie nocive, tuttavia, condividono alcuni meccanismi. Le maree rosse spesso si formano quando il riscaldamento o un apporto superficiale di acqua dolce creano uno strato che si sovrappone alle acque più fredde e ricche di sostanze nutrienti. Le alghe a crescita rapida esauriscono velocemente le sostanze nutrienti presenti nello strato superiore, lasciando azoto e fosforo solo al di sotto dell'interfaccia fra gli strati, il cosiddetto picnoclino. Il fitoplancton non dotato di mobilità non può accedere facilmente a questo strato, mentre le alghe mobili, tra cui i dinoflagellati, possono raggiungerlo. Molte di queste alghe si spostano a velocità che superano anche i dieci metri al giorno e alcune sono capaci di una migrazione verticale con ciclo giornaliero: se ne stanno nelle acque superficiali durante il giorno per ricevere la luce solare, come pigri bagnanti e, al sopraggiungere del buio, si spostano verso il picnoclino per consumare le sostanze nutrienti. Di conseguenza, le fioriture algali possono fare una comparsa improvvisa anche in acque superficiali molto povere di nutrienti, che sembrerebbero inadatte a sostenere una crescita così prolifica.

Un pennacchio di acque calde (*in verde*), ben visibile in termografie riprese da satellite, si mosse dal Maine meridionale verso la Massachusetts Bay nel 1987, trasportando colonie del dinoflagellato *Alexandrium tamarense*. Le tecniche di telerilevamento sono di aiuto ai ricercatori per seguire gli spostamenti delle fioriture algali che vengono trasportate da masse d'acqua distinguibili.

Le intossicazioni da molluschi con sintomatologia di tipo paralitico hanno interessato nel 1990 un numero doppio di aree rispetto a vent'anni prima. È possibile che questo fenomeno sia dovuto all'inquinamento costiero e a pratiche legate alla navigazione.

Uno stratagemma simile può essere attuato anche orizzontalmente, seppure su distanze molto maggiori. L'episodio NSP del North Carolina illustra come le correnti oceaniche possano trasportare specie tossiche da una zona all'altra. Patricia A. Tester, biologa presso il National Marine Fisheries Service Laboratory di Beaufort della National Oceanic and Atmospheric Administration, ha esaminato al microscopio plancton delle acque locali subito dopo i primi rapporti sulle intossicazioni. Ha potuto osservare cellule che assomigliavano al dinoflagellato *G. breve*, la causa di ricorrenti episodi NSP lungo la costa occidentale della Florida. Gli esperti confermarono ben presto la sua identificazione e per la prima volta nella storia di quello Stato le autorità sanitarie disposero la chiusura degli allevamenti di molluschi a causa delle tossine algali. Ciò comportò un danno economico di 20 milioni di dollari.

La Tester e i suoi collaboratori hanno da allora fatto uso di immagini da satellite delle temperature alla superficie del mare, e hanno potuto ipotizzare che la popolazione di *G. breve* del North Carolina si fosse originata al largo della costa sudoccidentale della Florida, a quasi 1000 chilometri di distanza. Questa fioritura aveva viaggiato dal Golfo del Messico lungo la costa sudorientale degli Stati Uniti, trasportata da un sistema di molte correnti che ha la sua direttrice principale nella Corrente del Golfo. Dopo 30 giorni di trasporto, una corrente secondaria si separò dalla Corrente del Golfo, dirigendosi verso la stretta piattaforma continentale del North Carolina e recando con sé cellule di *G. breve*. La massa di acqua calda rimase in prossimità della costa, ben identificabile nelle immagini da satellite per tre settimane. Fortunatamente *G. breve* non ha capacità di incistamento, cosicché non ha potuto colonizzare stabilmente questa nuova regione.

Questo incidente, considerato insieme con molti altri analoghi che avvengono in tutto il mondo, denuncia una tendenza preoccupante. I problemi causati dalle maree rosse si sono aggravati nel corso degli ultimi due decenni. Le cause di ciò sono molteplici e solo alcune sono riconducibili all'inquinamento o in generale all'attività umana. Si deve tenere presente, per esempio, che la espansione generalizzata delle attività di acquacoltura fa sì che un numero maggiore di aree venga tenuto sotto stretto controllo. Analogamente, la nostra scoperta di tossine in specie algali considerate in precedenza non tossiche riflette la maturazione di questo campo della scienza, che ora può avvalersi di un maggior numero di ricercatori, di migliori tecniche di analisi, di una più perfezionata strumentazione chimica e di una comunicazione più efficiente fra gli addetti.

Gli studi a lungo termine a livello locale o regionale dimostrano che le maree rosse (nel senso più generale del termine) stanno avendo incrementi correlati all'aggravarsi dell'inquinamento costiero. A Hong Kong, tra il 1976 e il 1986, con l'aumentare di sei volte della popolazione intorno a Tolo Harbor, le maree rosse sono aumentate di otto volte. L'inquinamento ha presumibilmente offerto alle alghe una quantità molto maggiore di sostanze nutrienti. Una situazione simile si è registrata nel Mare Interno del Giappone, dove le maree rosse visibili sono costantemente andate aumentando dalle 44 all'anno nel 1965 a oltre 300 un decennio più tardi. Le autorità giapponesi hanno imposto rigorosi controlli sugli scarichi a mare a metà degli anni settanta, e a ciò ha fatto seguito una riduzione del 50 per cento del numero di maree rosse.

Questi esempi sono stati criticati, in quanto entrambi potrebbero essere falsati dalle variazioni nel tempo del numero di osservatori e inoltre si riferiscono alla semplice registrazione dei cambiamenti di colore delle acque a causa di fioriture e non propriamente agli episodi tossici o dannosi. Inoltre i dati dimostrano quella che dovrebbe essere una relazione ovvia: le acque costiere che ricevono rifiuti di origine industriale, agricola e domestica, frequentemente ricchi di sostanze nutrienti per le piante, sono soggette a un incremento generalizzato della crescita algale. Queste sostanze nutrienti possono favorire episodi tossici o dannosi in molti modi diversi. Molto semplicemente, tutte le specie fitoplanctoniche, sia quelle tossiche sia quelle innocue, beneficiano di questi apporti, ma noi notiamo la proliferazione delle sole specie tossiche.

Alcuni ricercatori ipotizzano invece che l'inquinamento stimoli selettivamente le specie pericolose. Theodore J. Smayda dell'Università del Rhode Island chiama in causa l'ipotesi del rapporto fra i nutrienti, un concetto noto da molto tempo in letteratura scientifica. Egli sostiene che le attività umane abbiano alterato la disponibilità relativa di specifiche sostanze nutrienti nelle acque costiere, in modo da favorire le specie tossiche. Per esempio le diatomee, la maggior parte delle quali sono innocue, hanno bisogno di silicio per costruire le loro pareti cellulari, a differenza del resto del fitoplancton. Dato che il silicio non abbonda nelle acque di scarico - che viceversa sono ricchissime di azoto e fosforo - il rapporto fra azoto e silicio o fra fosforo e silicio nelle acque costiere è sensibilmente aumentato negli ultimi decenni. La crescita delle diatomee cessa quando la disponibilità di silicio si esaurisce, ma altri gruppi fitoplanctonici, che spesso comprendono specie più tossiche, possono proliferare utilizzando l'azoto e il fosforo in eccesso. Questa idea è controversa, ma non priva di fondamento. Rilevamenti effettuati per un periodo di 23 anni sulle coste della Germania documentano un aumento di quattro volte dei rapporti azoto/silicio e fosforo/silicio, accompagnato da un sensibilissimo cambiamento nella composizione della comunità fitoplanctonica: le diatomee sono diminuite, mentre i dinoflagellati sono aumentati di oltre 10 volte.

Un altro motivo di preoccupazione è il trasporto a lunga distanza delle specie algali a opera delle navi da carico. Da molto tempo si sa che le navi trasportano organismi marini nella loro acqua di zavorra, ma ora appare chiaro che anche le alghe tossiche hanno approfittato di simili «passaggi» attraverso gli oceani. Gustaaf M. Hallegraeff, dell'Università della Tasmania ha spesso indossato un elmetto da minatore per avventurarsi nelle viscere di grandi navi da carico e campionare i sedimenti accumulati nelle cisterne di zavorra. Egli ha trovato più di 300 milioni di cisti di dinoflagellati tossici in una sola nave. Hallegraeff suppone che una specie di dinoflagellati produttrice di tossina PSP abbia per la prima volta fatto la sua comparsa nelle acque della Tasmania negli ultimi due decenni, in concomitanza con lo sviluppo di un'industria locale per la produzione di trucioli di legno. Le navi scariche che iniziano il loro viaggio in un porto straniero pompano acqua e sedimenti nelle loro cisterne di zavorra; quando i trucioli vengono caricati in Tasmania, si svuotano le cisterne. Le cisti sopportano agevolmente il viaggio di trasferimento e vanno a colonizzare il nuovo sito. Le autorità australiane hanno ora emanato disposizioni per la discarica di acque di zavorra nelle acque territoriali. Purtroppo la maggior parte delle altre nazioni non prevede restrizioni analoghe.

Negli ultimi dieci anni gli effetti dell'uomo sull'ambiente terrestre si sono imposti prepotentemente all'attenzione dell'opinione pubblica. Agli occhi di alcuni, i principali segni della nostra trascuratezza nei confronti dell'ambiente sono da individuare nelle previsioni di un riscaldamento globale, nella deforestazione e nel venir meno della biodiversità. Per me e i miei colleghi questo decennio ha manifestato una preoccupante espansione nella complessità e nella scala del fenomeno delle maree rosse. Vi sono chiare indicazioni del fatto che l'inquinamento ha incrementato l'abbondanza delle alghe, comprese le specie dannose e tossiche. Questo effetto è ovvio a Hong Kong e nel Mare Interno del Giappone ed è forse reale anche se meno evidente in regioni ove l'inquinamento costiero è più graduale e meno pervasivo. Ma non possiamo addebitare tutti i nuovi episodi di fioriture algali all'inquinamento. Vi sono molti altri fattori che contribuiscono alla proliferazione delle specie tossiche; alcuni hanno a che fare con l'attività dell'uomo, altri no. In ogni caso i fenomeni che abbiamo descritto non dovrebbero assolutamente essere sottovalutati. Con la crescita della popolazione mondiale vi sarà una domanda sempre maggiore di risorse alimentari di origine marina. Dobbiamo pertanto rispettare le nostre acque costiere e ridurre al minimo le attività che favoriscono quegli spettacolari e distruttivi episodi che vanno sotto il nome di maree rosse.

BIBLIOGRAFIA

SMAYDA THEODORE J., *Primary Production and the Global Epidemic of Phytoplankton Blooms in the Sea: A Linkage?* in *Novel Phytoplankton Blooms: Causes and Impacts of Recurrent Brown Tide and Other Unusual Blooms*, a cura di E. M. Cosper, V. M. Bricelj e E. J. Carpenter, Springer-Verlag, 1989.

ANDERSON DONALD M. e WHITE ALAN W., *Marine Biotoxins at the Top of the Food Chain* in «Oceanus», 35, n. 3, 1992.

TODD EWEN C. D., *Domoic Acid and Amnesic Shellfish Poisoning: a Review* in «Journal of Food Protection», 56, n. 1, gennaio 1993.

HALLEGRAEFF GUSTAAF M., *A Review of Harmful Algal Blooms and Their Apparent Global Increase* in «Phycologia», 32, n. 2, marzo 1993.

TAKESHI YASUMOTO e MICHIO MURATA, *Marine Toxins* in «Chemical Reviews», 93, n. 5, luglio/agosto 1993.

Le rivelazioni delle ossa di Abu Hureyra

Le fatiche quotidiane in uno dei primi insediamenti agricoli del Vicino Oriente hanno lasciato tracce eloquenti sullo scheletro degli abitanti, permettendoci di ricostruire il modo in cui si procuravano da vivere

di Theya Molleson

La ricostruzione dei modi di vita dell'antichità è paragonabile a una indagine poliziesca: gli indizi sono rari e preziosi, e bisogna trarre deduzioni da testimonianze frammentarie come ossa, manufatti durevoli e resti di abitazioni. Lavorando come paleontologa al Natural History Museum di Londra, sapevo che una collezione di ossa umane del primo Neolitico era stata portata in Inghilterra dagli scavi di Abu Hureyra, nell'attuale Siria settentrionale. Le ricerche archeologiche erano state compiute nel 1972 e 1973 - poco prima che il sito venisse sommerso dalle acque del bacino artificiale creato dalla nuova diga di Tabqa - da Andrew M. T. Moore, allora all'Università di Oxford (si veda l'articolo *Un villaggio agricolo preneolitico sull'Eufrate* di Andrew M. T. Moore in «Le Scienze» n. 134, ottobre 1979). Dalle sette trincee scavate nel sito di Abu Hureyra sono stati recuperati i resti scheletrici identificabili di 162 individui (75 bambini e 87 adulti, di cui 44 donne, 27 uomini e 16 di sesso non determinabile); il giacimento copre un arco di tempo di circa 3000 anni.

Insieme con i miei colleghi ho pensato che queste ossa potessero rivelare dettagli della vita quotidiana degli abitanti di Abu Hureyra, e quindi anche di altri gruppi neolitici i cui membri avevano compiuto un'analoga transizione da una economia di caccia e raccolta a una basata sull'agricoltura. Tracce degli eventi della vita di un individuo - alcune lasciate da malattie, altre dal lavoro - possono rimanere impresse sulle ossa e sui denti dello scheletro. Il loro studio accurato ha effettivamente fornito una messe di informazioni - soprattutto sulle donne della comunità - che forse non sarebbero mai state scoperte in altro modo.

Abu Hureyra fu abitato in due epoche differenti. La prima va da 11 500 a 10 000 anni fa circa, appena prima dello sviluppo dell'agricoltura. Gli abitanti preneolitici di questo insediamento raccoglievano un'ampia varietà di piante alimentari selvatiche, fra cui lenticchie, piccolo farro, segale, orzo, drupe di bagolaro e pistacchi. Essi davano anche la caccia alle gazzelle che in primavera migravano verso l'Eufrate. Il secondo insediamento venne fondato dopo un periodo di abbandono di 200 anni per il quale non è stato possibile trovare alcuna spiegazione. Gli abitanti di questo sito del Neolitico iniziale disponevano di un'ampia gamma di piante coltivate: farro, piccolo farro, avena, orzo, ceci e lenticchie. Tutte queste piante, prima di poter essere consumate, richiedevano una fase di preparazione che comportava dispendio di tempo e di fatica.

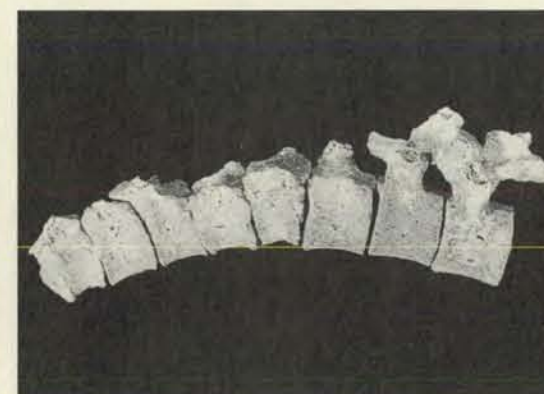
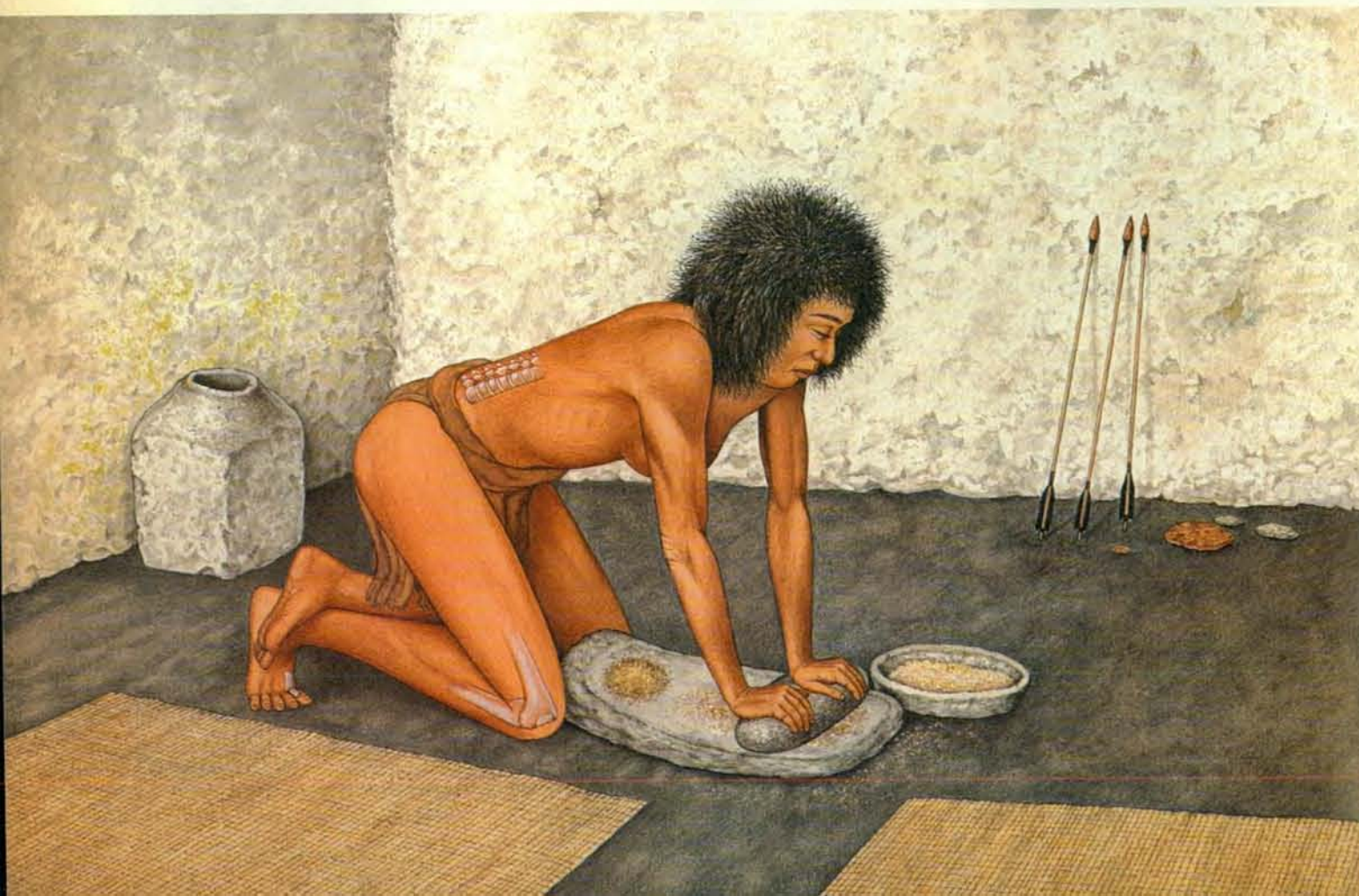
I segni di questo duro lavoro possono essere letti nelle ossa della gente di Abu Hureyra. Fra le prime particolarità scheletriche che abbiamo notato vi sono le tracce di sollecitazioni intense, e qualche volta eccessive, dovute al trasporto di carichi pesanti, molto probabilmente animali abbattuti, prodotti agricoli o materiali da costruzione. Queste tracce erano particolarmente evidenti nei giovani. In un adolescente che deve compiere questo tipo di sforzi ci si possono attendere modificazioni nella forma delle vertebre cervicali, e questo è proprio ciò che abbiamo riscontrato. È anche probabile che i carichi venissero portati sul capo: i tubercoli delle vertebre cervicali appaiono ingrossati, a indicazione del fatto che l'osso si è sviluppato in una struttura di sostegno; nel caso ciò non fosse accaduto, il collo avrebbe potuto piegarsi se sottoposto a un carico pesante. In alcuni individui abbiamo notato alterazioni degenerative delle vertebre cervicali, che potrebbero essere il risultato di lesioni subite nel portare pesi.

Questi casi non erano comuni. Di fatto, sembra che lo stato di salute degli abitanti di Abu Hureyra fosse in generale buono, con l'eccezione di alcune deformazioni ossee che si presentavano con frequenza: schiacciamento di vertebre (sempre dell'ultima vertebra lombare) e chiari segni di artrite nell'alluce. Queste malformazioni erano associate a tracce indicanti arti molto muscolosi: le ossa testimoniano con evidenza una intensa attività fisica, che poteva anche produrre lesioni.

Per un certo tempo, arrivammo addirittura a pensare che la popolazione di Abu Hureyra si dedicasse a qualche attività sportiva o atletica, anche se questo ci sembrava un po' improbabile in pieno Neolitico. Rimanemmo in dubbio fino a che un nostro collega in vacanza in Egitto notò che nelle raffigurazioni sulle pareti dei templi i supplicanti inginocchiati erano sempre mostrati con gli alluci piegati in avanti. Questa osservazione suggeriva che un'attività tale da richiedere una postura inginocchiata avrebbe potuto provocare le patologie da noi riscontrate nella popolazione di Abu Hureyra.

Durante gli scavi Moore aveva ritrovato in molte stanze pietre da macina dalla caratteristica forma «a sella», che erano state abbandonate nel punto in cui venivano utilizzate. Mi convinsi che la postura che aveva causato le deformazioni dell'alluce consisteva nel rimanere in ginocchio per lunghe ore triturando a mano i cereali sulla pietra da macina. Gordon Hillman dell'Università di Londra, che aveva esaminato i resti vegetali trovati nel sito, non ne era altrettanto sicuro, e fece notare che un passo essenziale nella preparazione dei cereali - la rimozione della pula per battitura con un pestello in un mortaio - doveva pure essere svolto stando in ginocchio. In effetti entrambi i compiti erano verosimilmente causa delle alterazioni vertebrali, ma è improbabile che la rimozione della pula abbia potuto provocare la deformazione dell'alluce, in quanto la persona impegnata nel lavoro poteva cambiare posizione durante la battitura, ma non durante la macinazione.

Era quindi la preparazione dei cereali per l'uso alimentare a costituire l'attività fisicamente più impegnativa e intensiva svolta ad Abu Hureyra, come accade ancora oggi in molti luoghi della Terra. Questo lavoro doveva essere eseguito quotidianamente perché i cereali non si conservavano a lungo dopo essere stati privati degli involucri esterni. La battitura con mortaio e pestello e la successiva triturazione dei semi sulla pietra da macina impegnavano senza dubbio buona parte della giornata. Quelli che abbiamo trovato sulle ossa, dunque, erano i segni rivelatori delle lunghe ore dedicate a questo lavoro; pure evidenti erano tracce di lesioni, forse causate dall'eccessivo affaticamento fisico o dalla fretta.

Gli strumenti per la macinazione ritrovati ad Abu Hureyra ci aiutano a stabilire in che modo si siano prodotte le

La triturazione dei cereali su una pietra da macina, un compito quotidiano per le donne di Abu Hureyra, sottoponeva a intensi sforzi varie articolazioni. Stando in ginocchio, la donna spingeva ripetutamente in avanti la pietra mobile e poi ritornava nella posizione di partenza. Questa attività, che occupava parecchie ore al giorno, alterava soprattutto le ossa mostrate nelle fotografie: l'alluce, la colonna vertebrale e le ossa dell'arto inferiore. L'alluce appare iperflesso e danneggiato; la colonna vertebrale mostra protuberanze ossee sulle vertebre; l'arto inferiore, di cui si vedono il femore nella parte alta della fotografia e la tibia in basso, presenta una sporgenza lungo la diafisi del femore ed escrescenze ossee al ginocchio.

alterazioni ossee. Le pietre da macina erano appoggiate direttamente a terra, anziché su una base o su un'altra struttura rialzata come si faceva in epoca successiva (i detriti che circondano le pietre confermano che esse sono state trovate là dove venivano utilizzate); perciò la persona che usava la pietra da macina doveva necessariamente stare in ginocchio.

Si immagini l'operazione. La donna incaricata del lavoro (come vedremo, si trattava di un compito esclusivamente femminile) poneva i chicchi sulla pietra fissa della macina e afferrava la pietra mobile con entrambe le mani. Stando in ginocchio, con gli alluci piegati in avanti, spingeva la pietra mobile fino all'estremità di quella fissa, terminando il movimento con il busto quasi parallelo al terreno e le braccia più o meno al livello della testa. Arrivata all'estremità della pietra fissa, si riportava di scatto nella posizione di partenza, con un movimento che definisco di richiamo. Lo spostamento delle braccia durante il piegamento in avanti impegnava i muscoli deltoidi delle spalle; questo movimento provocava anche la rotazione delle braccia verso l'interno, un'azione che veniva svolta soprattutto dai muscoli bicipiti.

Sono proprio le inserzioni del deltoide sull'omero (l'osso lungo del braccio) e del bicipite sul radio (una delle due ossa dell'avambraccio) ad apparire notevolmente sviluppate in questi individui. L'ipertrofia dei muscoli era simmetrica, ossia interessava entrambe le braccia in eguale misura; particolarmente vistosa era la tuberosità radiale (l'ingrossamento del radio in corrispondenza dell'inserzione del bicipite).

Stare inginocchiati per molte ore sollecita gli alluci e le ginocchia, mentre l'operazione della macinazione sottopone a sforzi le anche e soprattutto la regione lombare. Le caratteristiche lesioni osservate a livello dell'ultima vertebra lombare consistevano in schiacciamento e danni al disco intervertebrale; esse avrebbero potuto prodursi se la donna che eseguiva la macinazione superava l'estremità della pietra da macina durante il movimento in avanti o ritornava troppo rapidamente o vigorosamente alla posizione di partenza.

Durante la macinazione, il corpo fa perno in alternanza sulle articolazioni del ginocchio e dell'anca; il movimento sottopone il femore (l'osso lungo della coscia) a una considerevole sollecitazione di piegamento. Quest'osso sviluppa allora una netta sporgenza lungo la parte posteriore, per contrapporsi alla forza di piegamento esercitata dall'anca e dal ginocchio quando il peso del corpo oscilla avanti e indietro sopra la pietra da macina. Anche il ginocchio è soggetto a uno sforzo considerevole, dato che funge da perno del movimento; le superfici articolari tendono quindi a ingrossarsi. Tutti questi fenomeni sono evidenti in un gruppo di ossa da noi studiato. I femori erano incurvati e mostravano una sporgenza posteriore, mentre le ginocchia presentavano protrusioni ossee sulle superfici articolari.

Anche il piede è sottoposto a sforzi intensi durante la macinazione. Le dita sono piegate in avanti per dare appoggio, che è fornito in massima parte dagli alluci. Nei resti di Abu Hureyra, le articolazioni del primo metatarsale sono ingrossate e spesso lesionate. Vi sono anche segni di danni alla cartilagine: le superfici lisce e levigate dell'articolazione fanno pensare allo sfregamento di osso su osso; in alcuni individui si è avuto lo sviluppo di una evidente osteoartrite. In un caso l'alluce destro appariva colpito molto più gravemente del sinistro. Sebbene non si possa escludere un'origine infettiva per questa anomalia, può anche darsi che la donna in questione avesse l'abitudine di appoggiare un piede sopra all'altro per alleviare il dolore. Una posizione identica è mostrata in una statuetta di donna egizia che usa una pietra da macina, illustrata in *Egyptian Servant Statues* di J. H. Breasted.

Le modificazioni da noi osservate nelle ossa del braccio, della coscia e dell'alluce interessavano la morfologia dell'intero osso. Ciò avrebbe potuto verificarsi solo se alle ossa fossero state applicate sollecitazioni per molte ore al giorno quando l'individuo non aveva ancora completato lo sviluppo fisico. Simili attività sono state osservate anche molto di recente da viaggiatori. Michael Aster scrive in *A Desert Dies*: «La vita nell'oasi [sahariana] sembrava svolgersi a un passo lento e costante. Le donne... trascorrevano gran parte del proprio tempo triturando cereali sulle loro macine a mano... Spesso guardavo Hawa mentre poneva alcuni chicchi per volta sulla base di pietra e li lasciava scivolare giù mentre li triturava, rovesciando la farina in una ciotola a intervalli di pochi minuti. Dopo più o meno un'ora sua figlia, di circa nove anni, prendeva il suo posto e cominciava a macinare con grande energia. Potevano occorrere diverse ore per produrre abbastanza farina per un solo pasto».

Volevamo sapere se a eseguire la macinazione dei cereali ad Abu Hureyra fossero membri di ambo i sessi, ma trovare la risposta si è rivelato difficile. Gli scheletri erano così frammentati che abbiamo dovuto escogitare un metodo per determinare il sesso di un individuo solo da quelle ossa che mostravano le alterazioni derivanti, secondo la nostra ipotesi, dall'impiego di una pietra da macina. La misurazione del primo metatarsale dimostrò che esso era generalmente più grande negli uomini, e tenendo presente questo fatto potemmo stabilire che gran parte delle ossa alterate erano femminili.

Ne concludemmo che i cereali venivano generalmente preparati dalle donne di una famiglia. Sembra dunque che in questa popolazione del Neolitico iniziale vi fosse una divisione piuttosto generale dei ruoli. Gli abitanti di Abu Hureyra devono aver scoperto ben presto che il modo più efficiente per sopravvivere era quello di dividersi il compito di procurare cibo. Possiamo supporre che gli uomini andassero a caccia e, con l'avvento dell'agricoltura, coltivassero piante alimentari. Le donne della famiglia si assumevano l'incarico di preparare i cereali: un compito laborioso, o piuttosto una serie di compiti che occupavano molte ore al giorno e potevano produrre lesioni alla schiena, al ginocchio e all'alluce. Non c'è motivo per supporre che una simile divisione del lavoro sottintendesse una discriminazione tra i sessi: con tutta probabilità questa comparve successivamente.

Le donne però non erano le sole a subire conseguenze sull'organismo. I cereali triturati grossolanamente avevano effetti distruttivi sui denti. Una precauzione indispensabile con tutti i derivati dei cereali - eccetto la farina setacciata - è quella di rimuovere attentamente tutte le parti dure e le pietruzze. Il numero di denti spezzati nella popolazione neolitica di Abu Hureyra testimonia che questa operazione non veniva compiuta in modo molto efficiente, probabilmente per mancanza di setacci. Per la stessa ragione, i residui dell'involucro esterno dei chicchi rimanevano nella farina, e talvolta potevano infilarsi negli spazi interdentali e provocare infezioni gengivali. In compenso, la carie era rara: evidentemente la farina non veniva raffinata o cotta a sufficienza (ammesso che venisse cotta) da costituire un ambiente favorevole per i batteri che provocano cavità nei denti.

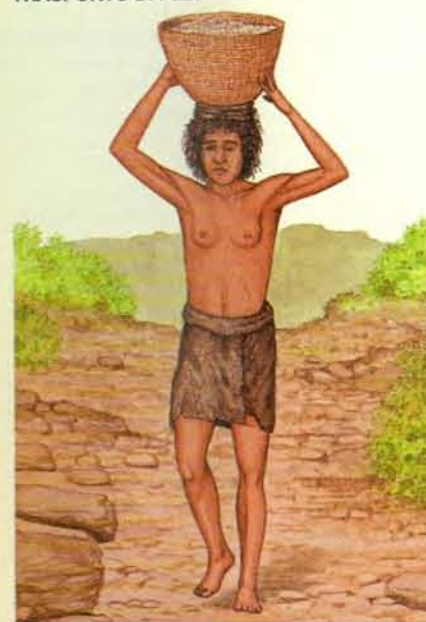
La rottura dei denti era soltanto uno dei problemi. Anche dopo battitura e macinazione, e indipendentemente dalla polvere che si staccava dalla pietra da macina, i cereali davano farina estremamente abrasiva. Molti individui perdevano i denti già in giovane età. Inoltre le microfotografie elettroniche a scansione dei denti di Abu Hureyra mostrano cavità paragonabili per dimensione a quelle prodotte sui denti di primati non umani dai noccioli dei datteri e da altri oggetti duri.

Gli abitanti di Abu Hureyra dovettero trovare un rimedio alla terribile usura dei denti. Durante gli scavi gli archeologi notarono occasionalmente, nei pavimenti dei livelli più tardi dell'insediamento, le impressioni di stuoie intrecciate. Questa scoperta di-

TRASPORTO DI PESI

USO DI MORTAIO E PESTELLO

POSIZIONE ACCOVACCIATA

USO DELLA PIETRA DA MACINA

Alterazioni ossee apparvero negli abitanti di Abu Hureyra in seguito alle attività qui illustrate. Il trasporto di pesi sul capo deformava le vertebre cervicali; la corrosione dell'osso indica danni al disco intervertebrale. La battitura con mortaio e pestello e la macinazione dei cereali sviluppavano i muscoli delle braccia, come indicano gli ingrossamenti dei due omeri (*in alto nella fotografia*) nei punti di inserzione dei deltoidi e dei due radii nei punti di inserzione dei bicipiti. La posizione accovacciata sollecitava il ginocchio, come indica la rotula incavata. La macinazione danneggiava l'ultima vertebra lombare; la fratturazione e la corrosione indicano schiacciamento e danni al disco intervertebrale. Anche l'alluce veniva alterato; si osservano segni di usura all'estremità destra dell'osso in alto nella fotografia e tracce di grave osteoartrite all'estremità destra dell'osso in basso.

mostra che all'epoca veniva ormai padroneggiata l'arte della intrecciatura. L'invenzione del setaccio - un'applicazione dei principî dell'intrecciatura - avrebbe comportato la possibilità di separare la farina dalle particelle minerali e dalla crusca. Oggi le donne del Vicino Oriente sanno adoperare il setaccio con tale destrezza da produrvi sopra tre mucchietti: pietruzze, crusca e farina. Poi rovesciano semplicemente le pietruzze nel palmo della mano. Il risultato è un rischio minore di rottura dei denti. Non abbiamo prove dirette dell'uso di setacci ad Abu Hureyra, ma l'usura dei denti appare nettamente meno grave nelle epoche più recenti.

Si dovettero anche trovare metodi per trasportare dai campi le piante raccolte, e l'impiego di canestri poté rappresentare la soluzione. Avevamo notato la presenza di strani solchi su incisivi e canini di alcuni individui dei livelli più tardi di Abu Hureyra. Nel preparare un canestro occorre manovrare simultaneamente tre elementi flessibili; dato che le mani sono impegnate nel tenere i primi giri del lavoro, per controllare gli elementi da intrecciare si usano i denti. Clark S. Larsen della University of North Carolina a Chapel Hill ha illustrato come questa tecnica venga utilizzata attualmente dalle donne indiane delle tribù paiute. L'abitudine di intrecciare in questo modo provoca la formazione, sulla superficie di canini e incisivi, di solchi quasi identici a quelli che si osservano sui denti di Abu Hureyra.

Le testimonianze scheletriche dell'attività di intrecciatura sono rare nei campioni da noi studiati, probabilmente perché le capacità necessarie erano possedute solo da pochi individui. I loro resti sono stati trovati in una sola zona dell'insediamento, il che fa pensare all'esistenza di un'area dedicata all'attività artigianale. Una simile specializzazione sarebbe una conseguenza naturale della divisione dei ruoli e avrebbe permesso l'acquisizione di esperienza e velocità nonché innovazioni tecnologiche. Se un abile artigiano è esonerato dall'impegno di procurarsi il cibo per il proprio sostentamento, può produrre setacci o canestri in quantità più che sufficiente per la comunità; eventuali eccedenze possono essere utilizzate per scambi commerciali.

Da una zona differente dell'insediamento giungono testimonianze dell'esistenza di un altro gruppo di donne dedite all'artigianato. Avevamo notato che parecchie delle mandibole ritrovate mostravano una superficie articolare enormemente ingrossata, oltre a un'usura dentaria oltremodo irregolare. Perché si producesse questo tipo di usura, i denti devono essere stati sottoposti a forze di compressione molto intense che hanno abraso i denti inferiori verso l'esterno e quelli superiori verso l'interno. In alcuni casi, l'usura si estende addirittura fino alla radice.

Tetsuya Kamegai della Iwate Medical University in Giappone ha osservato alterazioni simili nei maori che masticano steli di piante per preparare corde di fibra. Alcuni anni fa, J. D. Jennings dell'Università dello Utah descrisse i segni lasciati da denti usurati sui pezzetti di tabacco da masticare che si trovano a migliaia a Danger Cave, nello Utah, e che risalgono alla stessa epoca della comunità di Abu Hureyra. Nella grotta sono stati rinvenuti anche pezzi di spago fatti con steli masticati di giunco e stuoie realizzate con questo spago. Ritengo che anche ad Abu Hureyra si producessero stuoie in maniera simile, ipotesi confermata dalle impressioni nei pavimenti trovate durante lo scavo.

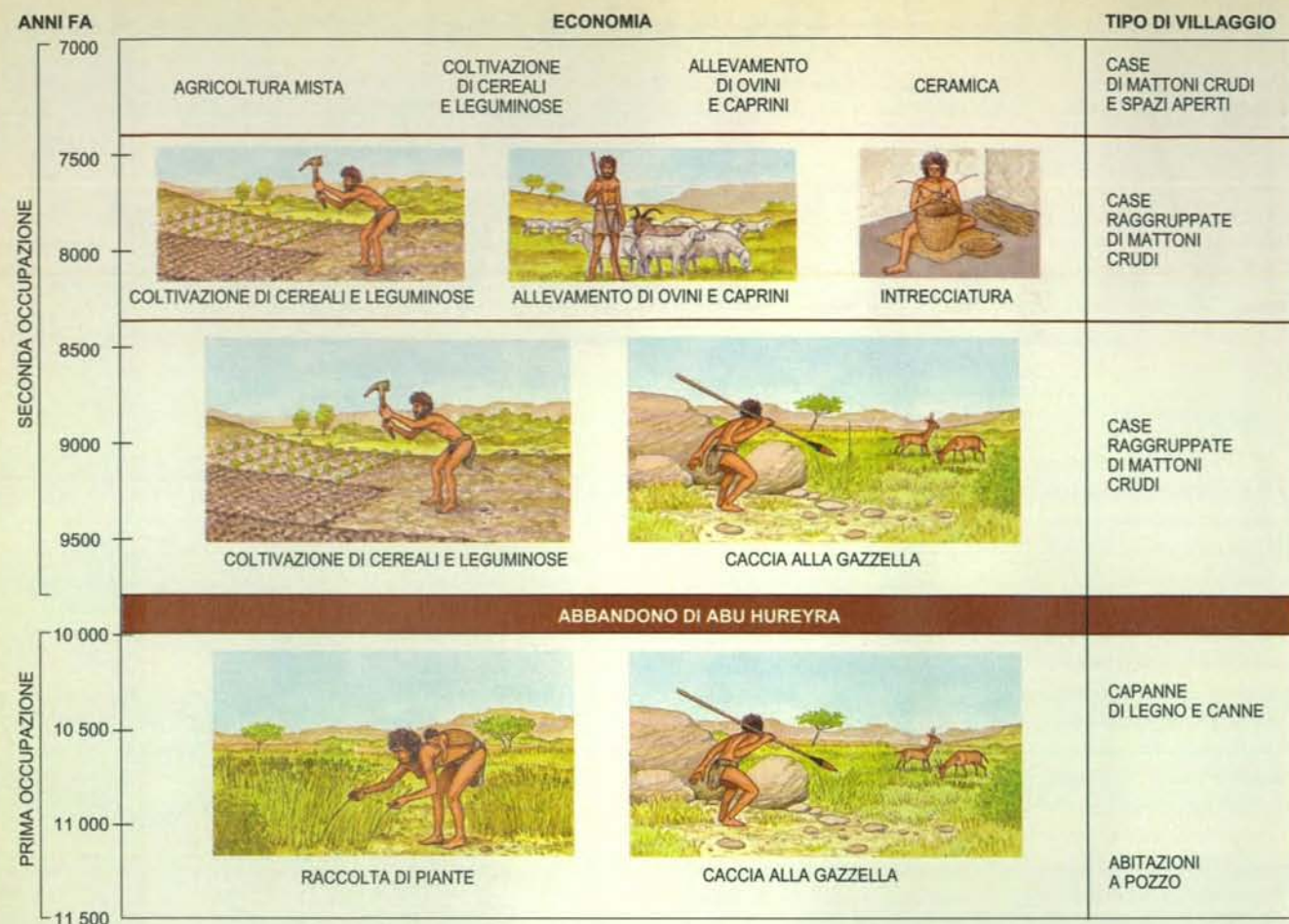
Circa 7300 anni fa la nuova tecnologia della ceramica portò radicali cambiamenti nella comunità. I contenitori di ceramica potevano essere utilizzati per ammollare e cuocere i cereali, e questo tipo di preparazione ridusse in maniera significativa l'usura dei denti, come si può vedere nelle microfotografie elettroniche a scansione.

Inoltre i cereali cotti sono più saporiti e facili da digerire: la cottura libera infatti i carboidrati contenuti nei chicchi e ne facilita l'assorbimento da parte dell'apparato digerente. La possibilità di preparare pappe e zuppe ebbe ben presto un effetto drastico sulla struttura di popolazione della comunità. Una singola conseguenza è evidente in una mandibola fratturata appartenuta a una donna; è improbabile che ella avesse potuto sopravvivere se non fosse stato disponibile un cibo semiliquido nutriente. Molto più significativo è il fatto che queste pappe potevano essere somministrate ai bambini al posto del latte materno. Poiché anche le madri avevano una dieta molto ricca di carboidrati, il risultato dello svezzamento precoce e della migliore alimentazione fu un aumento sostanziale della fecondità, con la riduzione dell'intervallo fra le nascite.

Questo effetto può essere osservato nella proporzione molto maggiore di scheletri infantili ritrovati nei livelli con ceramica rispetto agli strati più antichi. La proporzione è così alta, anzi, da far pensare che i bambini avessero un rischio elevato di morire a causa di malattie, presumibilmente perché la crescente densità di popolazione favoriva la trasmissione di agenti patogeni da un individuo all'altro. Alcuni scheletri infantili mostrano segni di ispessimento e di decalcificazione della zona orbitale, segni che probabilmente erano il risultato di un'anemia conseguente a infe-

ALIMENTAZIONE

INTRECCIATURA

All'inizio del Neolitico, l'usura dei denti era molto spiccata nella popolazione di Abu Hureyra. La farina grossolana prodotta dalla macinazione con pietre era abrasiva; inoltre, trattenere i fusti fra i denti durante il lavoro di intrecciatura di canestri produceva solchi profondi.

La cronologia di Abu Hureyra si estende per circa 4500 anni attraverso due fasi di occupazione del sito. I primi abitanti erano una popolazione preneolitica che viveva di caccia e raccolta e non praticava l'agricoltura. Le successive genti del Neolitico iniziale introdussero gradualmente la coltivazione di piante, la domesticazione di animali e attività artigianali.

zioni parassitarie croniche. È nei livelli con ceramica che cominciamo a trovare i primi segni di carie dentaria. I nuovi metodi di preparazione del cibo, che privilegiavano i cereali cotti per ottenere pane e zuppe, producevano alimenti che tendevano ad aderire ai denti e fornivano un ambiente adatto allo sviluppo dei batteri che provocano la carie.

Abu Hureyra fu abbandonato circa 7000 anni fa, così come molti altri siti neolitici del Vicino Oriente. Il perché non è chiaro: fra le possibilità vi sono epidemie, carestie e cambiamenti climatici. Sebbene fosse una società strutturata, Abu Hureyra rimase egualitario fino alla fine, almeno nelle pratiche sepolcrali; ma nel corso del Neolitico i ruoli divennero probabilmente più definiti e circoscritti.

L'introduzione di ruoli nel tessuto sociale è rispecchiata dagli usi sepolcrali. I morti venivano seppelliti sotto il pavimento delle case o in buche scavate nei cortili. I cadaveri sepolti negli interni sono molto più spesso femminili che maschili; la casa era di pertinenza delle donne, era il luogo dove esse vivevano e lavoravano. Sembra che le donne avessero a disposizione aree specifiche segnate dai limiti della casa; il loro territorio coincideva con lo spazio in cui svolgevano le loro attività. John Gold della Oxford Brookes University vede questa territorialità come un'espressione fondamentale dell'organizzazione sociale. I limiti di ruolo stabiliti in vita venivano mantenuti dopo la morte. Le alterazioni scheletriche che dimostrano come le donne trascorressero le loro giornate - macinando cereali, tessendo, intrecciando canestri e stuoie - riflettono un impegno che costituisce una vera specializzazione di ruolo.

Proprio questa divisione di ruoli potrebbe avere incoraggiato gli individui non immediatamente assorbiti nella preparazione del cibo a sviluppare nuove tecniche. L'agricoltura poneva problemi specifici: bisognava irrigare le pianticelle, impedire agli animali di distruggere le colture e trasportare i raccolti. Questi problemi fecero sì che si sperimentassero nuove tecnologie per risolverli; si idearono vasi, steccati e canestri, e alcuni divennero esperti nel prepararli.

Ad Abu Hureyra vediamo una serie di cambiamenti che possono essere interpretati alla luce di queste innovazioni; ogni progresso recava con sé problemi che richiedevano nuove soluzioni. Abu Hureyra rappresenta il primo passo verso la civiltà: per trovare segni di ricchezza, stratificazione sociale, istituzioni di élite ed erudizione bisognerà aspettare le epoche successive.

BIBLIOGRAFIA

LARSEN CLARK S., *Dental Modifications and Tool Use in the Western Great Basin* in «American Journal of Physical Anthropology», 67, n. 4, agosto 1985.

MOLLESON T., *Seed Preparation in the Mesolithic: The Osteological Evidence* in «Antiquity», 63, n. 239, giugno 1989.

MOLLESON THEYA e JONES KAREN, *Dental Evidence for Dietary Change at Abu Hureyra* in «Journal of Archaeological Science», 18, n. 5, settembre 1991.

MOLLESON T., JONES K. e JONES S., *Dietary Change and the Effects of Food Preparation on Microwear Patterns in the Late Neolithic of Abu Hureyra, Northern Syria* in «Journal of Human Evolution», 24, n. 6, giugno 1993.

La salute delle donne: un problema globale

di Marguerite Holloway

Per migliorare la salute delle donne occorre superare alcuni pregiudizi nei confronti del sesso e affrontare vere e proprie epidemie nascoste, come la violenza domestica

Parlare di discriminazione delle donne dal punto di vista sanitario può suonare un po' strano in un paese industrializzato, ma se si affronta il problema da un punto di vista globale non si può non constatare che per motivi di costume, di politiche sanitarie e a causa di una classe medica in gran parte maschile, è prevalsa la tendenza a considerare le donne come mogli e madri e poco altro. Ne consegue, come è stato messo in rilievo da un numero crescente di indagini, che si dedicano scarsissima attenzione e finanziamenti minimi a diversi aspetti della salute femminile (dall'alimentazione all'invecchiamento, dalla cura di malattie come l'AIDS ai disturbi tipicamente femminili). Siamo ancora molto lontani dal riconoscere formalmente che esiste un problema sanitario specificamente femminile.

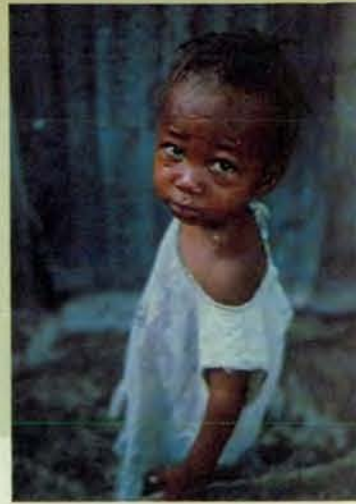
Le donne impegnate nella attività politica e sociale e quelle che hanno a che fare con il sistema sanitario, siano esse medico o paziente, cominciano a liberarsi da questi pregiudizi e richiedono un approccio sanitario che si basi sull'intero ciclo vitale della donna e che affronti con uguale scrupolo la malnutrizione nelle ragazze, il cancro del collo dell'utero nelle donne di mezza età e l'osteoporosi nelle donne più anziane. Questa linea di condotta ha portato alla luce alcuni degli attentati contro la salute femminile più gravi e più difficili da affrontare, quelli meno comunemente riconosciuti: la violenza domestica, i rischi dell'aborto illegale, le malattie trasmesse attraverso i rapporti sessuali, la barbara pratica di mutilazione dei genitali.

Paradossalmente, questi problemi riguardano in fondo più la società nel suo complesso che la salute delle donne in quanto tale. Cercando di compensare uno squilibrio, medici, sociologi, esperti di diritto e di pianificazione familiare hanno posto l'attenzione su aree che erano state trascurate non solo nei confronti delle donne, ma anche degli uomini. Promuovere la salute delle donne comporta un riesame della sessualità e, più in generale, dei costumi; comporta, in larga misura, il miglioramento della salute sessuale dei maschi e degli adolescenti; comporta il coinvolgimento degli uomini. Detto in poche parole, garantire la salute delle donne significa trasformare la società.

Che sia necessario un profondo cambiamento lo dimostra il dramma della violenza domestica. La violenza contro le donne - infanticidio, abuso sessuale, violenza carnale, percosse, uxoricidio mascherato da incidente - è forse il problema più ignorato, ma più diffuso, che le donne si trovano a dover fronteggiare. Dato che poche donne denunciano la violenza domestica, gli esperti ritengono inattendibili le stime della sua incidenza: la percentuale di donne che subiscono violenza nel mondo potrebbe oscillare tra il 20 e più del 50 per cento. Stando ai dati, in alcune regioni si tratta di un fenomeno epidemico. Un'indagine recentemente svolta in Papua Nuova Guinea ha messo in luce che il 56 per cento delle donne sposate che vivono in città riferivano di subire percosse e il 18 per cento delle donne sposate erano finite in ospedale perché picchiate dai mariti; in campagna, invece, il 67 per cento delle donne sposate avevano subito violenza tra le pare-

Questa immagine, che riunisce quattro generazioni, vuole essere emblematica del concetto di un'assistenza sanitaria che si occupi con uguale attenzione dell'intero ciclo vitale della donna. Spesso le politiche sanitarie tendono a trattare le donne esclusivamente come madri o mogli, ignorando altri aspetti relativi al loro benessere. Le donne e gli operatori in campo sanitario richiedono, e stanno mettendo in pratica, un approccio più complessivo all'assistenza medica, applicabile a tutti gli stadi della vita.

L'ecografia del feto può rivelarne il sesso. In Cina e in India questa informazione si usa per abortire le femmine.

La povertà danneggia più le femmine dei maschi perché le bambine, come questa piccola brasiliana, sono meno considerate.

Ad Haiti l'indice di mortalità è del 61,2 per 1000 per le bambine contro il 47,8 dei coetanei maschi.

La mutilazione dei genitali è praticata in 26 paesi africani, tra cui l'Egitto, cui si riferisce la fotografia. Ogni anno sono circa due milioni le ragazze mutilate.

Questa *teenager* dello Iowa è una del milione di ragazze statunitensi che rimangono incinte ogni anno.

Attualmente le donne sono il segmento di popolazione dove l'infezione da HIV sta registrando l'espansione più rapida.

ti domestiche. A Bombay, una donna su quattro d'età compresa tra i 15 e i 24 anni muore per incendi «accidentali» (si tratta di un modo per assicurarsi un'altra dote attraverso un secondo matrimonio). Negli Stati Uniti, il 22-35 per cento delle donne che si rivolgono al pronto soccorso lo fanno per lesioni dovute a violenza domestica. Le percosse sono la causa principale di lesione per le donne americane.

«Mi chiedono sempre quale sia la situazione peggiore, se quella indiana, dove le donne vengono bruciate, o quella statunitense» afferma Lori Heise del Pacific Institute for Women's Health di Washington, D.C. «Ma io non ritengo che sia costruttivo porre a confronto situazioni del genere. Il fatto è che la violenza sistematica nei confronti delle donne viene tollerata in molte società.» Per esemplificare questo concetto, la Heise cita spesso un incidente avvenuto in Kenya nel 1991, quando i ragazzi del Collegio di San Kizito fecero irruzione nel dormitorio femminile stuprando 71 ragazze e uccidendone 19. Le parole attribuite al loro capo sono le seguenti: «I ragazzi non volevano assolutamente fare del male alle ragazze. Volevano solo violentarle.»

Una simile giustificazione della violenza - sia essa aperta o implicita - è comune ovunque. È proprio in questo atteggiamento radicato nelle relazioni tra uomini e donne che si annida, secondo chi si occupa di salute femminile, la principale minaccia alla salute. È questo atteggiamento che ha impedito alle donne di sfuggire ai loro violentatori; ai medici di riconoscere l'estensione del problema dal punto di vista clinico; agli uomini di modificare il proprio comportamento. Afferma la Heise: «La violenza è socialmente determinata. Abbiamo prove sufficienti per dimostrare che si può superare qualunque tendenza degli uomini al comportamento aggressivo».

È soprattutto all'interno del movimento per la salute femminile negli Stati Uniti e nel campo della pianificazione familiare a livello internazionale che si è fatta strada la consapevolezza che la salute delle donne dipende dalla trasformazione della società e che il sistema medico tende a ignorare problemi come quello della violenza in famiglia.

Per quanto le donne americane reclamino fin dagli anni sessanta una tutela della salute migliore e più rispettosa di ciò che attende specificamente alla condizione femminile, solo da pochi anni si va tenendo conto di tali esigenze nella pianificazione di una politica della salute. Nel 1990, il General Accounting Office pubblicò una relazione che segnalava la mancanza di donne e di appartenenti alle minoranze tra i soggetti considerati nella sperimentazione sui farmaci. Dato che molte donne, alcune delle quali incinte, stavano già assumendo i farmaci in questione, la mancanza di dati sulle interazioni ormonali e sulle differenze di metabolismo faceva ritenere che si stesse ignorando, e quindi mettendo a rischio, la salute delle donne e delle minoranze. Questo problema comincia a essere preso in considerazione, cosicché si è visto come le risposte siano differenziate a seconda del sesso nei confronti di alcuni antidepressivi e anticonvulsivi, e come pure siano diverse le reazioni ai farmaci per l'ipertensione a seconda dell'appartenenza razziale.

Un'eredità di disattenzioni

In quello stesso periodo, è stato messo in evidenza che malattie specificamente femminili, come il cancro della mammella e i disturbi legati alla menopausa, non erano state studiate con la stessa attenzione data a malattie tipicamente maschili come il cancro della prostata. Per di più, lo studio di molte malattie cui sono soggetti entrambi i sessi, in particolare le cardiopatie e l'AIDS, aveva trascurato di indagare l'eziologia o le diverse manifestazioni delle malattie nelle donne.

Questa trascuratezza è ben documentata nel caso dell'AIDS. Non si può dire che le donne affette da AIDS o comunque infettate dall'HIV non siano state considerate, ma perlopiù questa attenzione riguardava le modalità di trasmissione del virus ai partner o ai figli. Il problema della trasmissione dell'HIV dalle prostitute ai loro clienti, come pure l'epidemiologia dell'AIDS in questo gruppo di donne, è stato affrontato da parecchi ricercatori. Molti si sono anche occupati della trasmissione prenatale del virus, cercando di scoprire come, quando e con quale grado di probabilità le madri trasmettano l'infezione al feto o al neonato. (Ora sappiamo che le donne sieropositive per l'HIV hanno una probabilità compresa tra il 15 e il 40 per cento di trasmettere il virus prima o durante il parto.)

Considerare le donne solo in relazione agli uomini o ai figli ha portato a conseguenze di tragica evidenza. Il numero di donne infettate dall'HIV è cresciuto, in proporzione, molto più rapidamente di quello degli uomini portatori di virus, sia negli Stati Uniti sia nelle altre regioni del mondo. L'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) calcola che nel 2000 ci saranno tra 30 e 40 milioni di persone infettate dal virus dell'AIDS, metà o anche più delle quali donne. L'AIDS è già la principale causa di morte per le donne afroamericane tra i 20 e i 40 anni nello Stato di New York e nel New Jersey; anche nell'Africa subsahariana l'AIDS è il principale responsabile di morte per le donne della stessa fascia di età.

Fino al 1992, nonostante l'enorme diffusione di questa epidemia, i Centers for Disease Control and Prevention degli Stati Uniti non prendevano in considerazione i sintomi ginecologici per diagnosticare l'AIDS. Inoltre, dato che la ricerca di mezzi alternativi di protezione è appena all'inizio, le donne devono continuare a confidare nella disponibilità del partner all'uso del preservativo. L'equivalente femminile del profilattico, di recente immesso sul mercato, può offrire lo stesso grado di protezione, ma richiede comunque la disponibilità dell'uomo. Soltanto di recente si è cominciata a fare ricerca su sostanze in grado di distruggere il virus che le donne possano gestire direttamente e, se è necessario, privatamente. Si spera anche di trovare un metodo di prevenzione dell'AIDS che consenta la gravidanza.

Negli Stati Uniti, la comunità medica e il Governo si sono mossi al fine di assicurare che le donne non siano più emarginate. Viene sottoposta a revisione la stessa professionalità medica, dato che la responsabilità di aver trascurato la salute delle donne ricade principalmente sull'ambiente medico, tradizionalmente a forte impronta maschile. Le donne medico hanno suscitato dibattiti sul curriculum che porta all'esercizio della professione medica; nelle facoltà mediche si sta valutando l'opportunità di istituire una specializzazione in medicina delle donne.

A livello federale è stato istituito nel 1990 un Office for Research on Women's Health presso i National Institutes of Health. Grazie a questa istituzione, è stato programmato uno studio, che dovrebbe partire nel 1995 con uno stanziamento di molti milioni di dollari, sugli effetti dell'alimentazione sulla salute delle donne più anziane. Le sperimentazioni cliniche devono ora effettuarsi su campioni in cui siano adeguatamente rappresentati anche le donne e gli appartenenti alle minoranze. Alcuni scienziati tendono però a opporsi a questa condizione, sostenendo che raggiungere le quote previste potrebbe compromettere la fattibilità dello studio e la validità dei risultati.

Ciò che funziona negli Stati Uniti può non andar bene in altri contesti culturali e politici. Nelle nazioni in via di sviluppo, fa notare Beverly Winikoff del Population Council della città di New York, nessun movimento chiede di includere anche le donne nelle sperimentazioni cliniche, e anzi viene richiesto proprio il contrario: di non fare esperimenti sulle donne. Una tradizione di esperimenti di controllo delle nascite condotti in violazione delle norme etiche ha reso le donne diffidenti. In uno di questi esperimenti, ad alcune donne messicane era stato detto che veniva loro somministrata una pillola anticoncezionale. In realtà a molte veniva dato un placebo. A quelle che rimasero incinte e fecero richiesta di abortire l'intervento non fu consentito.

L'insoddisfazione delle donne nei confronti del campo d'intervento e della qualità dei servizi di pianificazione familiare ha portato a spostare l'attenzione della comunità internazionale sull'intero ciclo vitale della donna. Diversi programmi elaborati negli anni sessanta per frenare la crescita demografica attraverso la contraccezione o la sterilizzazione si sono trasformati fino a rientrare nei principali canali di approccio alla salute delle donne. Tuttavia, come è avvenuto negli Stati Uniti, le donne raggiunte da questi servizi hanno continuato a essere rinchiuse nel loro ruolo di riproduttrici. Se in un primo tempo, infatti, l'obiettivo era quello di garantire l'accesso al controllo delle nascite in modo da frenare la crescita della popolazione, in seguito, agli inizi degli anni ottanta, alcuni di questi programmi si allargarono a comprendere la lotta contro la mortalità infantile.

Con il passare del tempo, divenne ovvio che i programmi rivolti a ottenere il controllo delle nascite non prendevano necessariamente in considerazione i bisogni relativi alla salute delle donne in gravidanza. Alcuni programmi venivano ritenuti coercitivi o incompleti, in quanto non riuscivano a seguire gli effetti collaterali indesiderabili prodotti dai contraccettivi. «Divenne del tutto chiaro che importava soltanto la salute del bambino» fa notare Adrienne Germain, vicepresidente dell'International Women's Health Coalition della città di New York. «La madre veniva considerata solo un mezzo per garantirla.»

La questione ha avuto e continua ad avere penosi corollari, che rivelano la scarsità di informazione medica sulla salute delle donne. Come ha spiegato Deborah Maine, epidemiologa alla Columbia University, molti medici, proiettando l'esperienza delle nazioni industrializzate sui paesi in via di sviluppo, hanno dato per scontato che ciò che va bene per la mamma vada bene anche per il bambino. Per esempio, migliorare l'apporto nutrizionale al feto è di per sé una buona idea. Ma nelle regioni povere dell'America Latina molte ragazze sono mingherline perché da piccole non si sono nutrite adeguatamente e le loro ossa pubiche e il canale del parto rimangono poco sviluppati. Pertanto, in mancanza di un'adeguata assistenza medica durante il parto, un nascituro molto sviluppato può significare la morte per la madre.

Nonostante questi errori, la campagna di pianificazione familiare con il duplice obiettivo di migliorare la salute dei bambini e abbassare la fertilità ha avuto successo. Dal 1960 a oggi la mortalità infantile è diminuita del 43 per cento e contemporaneamente la percentuale di donne nei paesi in via di sviluppo che si servono di qualche forma di contraccezione è salita dal 9 al 51 per cento. La mortalità delle madri rimane tuttavia alta. Ben 500 000 donne muoiono ogni anno in conseguenza di complicazioni insorte in corso di gravidanza o al mo-

Annualmente nel mondo muoiono 200 000 donne per cancro alla cervice uterina.

Pazienti affette da anemia in attesa di essere curate. Nei paesi in via di sviluppo sono circa 450 milioni le donne anemiche.

L'assistenza sanitaria di base è tipica di molte zone rurali del Kenya occidentale. Un'assistenza più completa alle donne comporterà un più vasto sistema di erogazione dei servizi.

La violenza domestica è per le donne una delle prime cause di lesioni. Negli Stati Uniti su 100 donne che si rivolgono al pronto soccorso circa 35 hanno subito percosse.

Le cure della levatrice sono spesso l'unico servizio prenatale per le donne del Ghana.

Una clinica per la pianificazione familiare in India fornisce contraccettivi, un servizio richiesto nel mondo da 100 milioni di donne.

mento del parto. «Sono stata in un ospedale in Bangladesh in cui si operano gli uomini feriti in incidenti o in collutazioni, ma non si pratica il taglio cesareo», afferma la Maine. «Non è considerato un'urgenza. E questo può far morire una donna.» Cosa che regolarmente si verifica. La differenza tra la mortalità materna che si registra nei paesi in via di sviluppo e quella dei paesi industrializzati continua a essere paurosamente significativa: una media di 420 decessi contro 26 ogni 100 000 nascite.

Tra il 25 e il 40 per cento di queste morti è attribuibile a pratiche abortive pericolose. Ogni anno si praticano 60 milioni di aborti, il 50 per cento dei quali sono clandestini nelle 52 nazioni dove l'aborto è illegale e nelle 55 nazioni in cui esistono condizioni che limitano la pratica legale. All'aborto illegale ricorrono soprattutto le ragazze sotto i 20 anni o comunque giovani donne non sposate cui difficilmente vengono forniti contraccettivi perché i programmi di pianificazione familiare sono stati predisposti per donne sposate. In molti Stati, fornire contraccettivi a ragazze di meno di venti anni è illegale.

«Alla salute delle donne viene prestata molta attenzione nei primi mesi di vita, quando ci si interessa di mortalità infantile; poi le donne vengono ignorate fino a quando non entrano in età fertile, quando ci si preoccupa delle loro capacità riproduttive, per poi scomparire di nuovo» conclude Maureen Law dell'International Development Research Center di Ottawa, coordinatrice dell'indagine su «donne e nutrizione nell'Africa subsahariana» che verrà effettuata questo autunno.

Donne che scompaiono

In effetti, coloro che si occupano di problemi sanitari rilevano che donne e ragazze semplicemente scompaiono, e non solo dalla mente di chi programma la politica della salute. Da uno studio del 1992 risulta che a Bombay su 8000 aborti praticati dopo che i genitori erano stati informati del sesso del nascituro, in un solo caso il feto era maschio. L'aborto selettivo e l'infanticidio delle bambine sono solo uno dei sistemi impiegati per favorire i maschi. Gli esperti dei problemi dello sviluppo, in particolare Amar-tya Sen della Harvard University, hanno stabilito che nel mondo stanno scomparendo 100 milioni di donne come risultante della combinazione di molti fattori socioculturali, tra i quali una scarsa cura della salute, l'alimentazione e la povertà.

A parità di cure, il rapporto tra gli indici di sopravvivenza delle femmine e quello dei maschi è 1,15. In Pakistan, invece, la mortalità tra le ragazze supera di una volta e mezzo quella dei ragazzi a causa di una migliore alimentazione riservata a questi ultimi. Nel mondo ci sono circa 450 milioni di donne denutrite contro 400 milioni di uomini. Monica Das Gupta, di Harvard, ha scoperto che in India i ragazzi hanno probabilità 50 volte maggiori di essere curati per denutrizione di quanto non abbiano le loro sorelle, sebbene le condizioni di denutrizione risultino 4 volte su 5 più gravi nelle ragazze. Nel Punjab, secondo stime fornite dalle Nazioni Unite, il 50 per cento delle ragazze di basso livello sociale pesa meno del 70 per cento del peso considerato normale per la loro età, mentre solo il 14 per cento dei ragazzi rimane al di sotto di tale percentuale.

L'incapacità dei servizi di pianificazione familiare di affrontare problemi come la denutrizione, la mortalità delle madri e altri aspetti della salute femminile ha portato molti specialisti ad appoggiare un sistema sanitario più realistico e di migliore qualità. Commenta Maine: «Invece di garantire la limitazione delle nascite e poi cercare di dimostrare che è quello che ci vuole per la salute delle donne, si deve partire dai bisogni delle donne e lavorare su quelli. Le donne e i loro medici sostengono che, invece di porre l'accento sulla fertilità, si contribuisce di più a migliorare la salute della popolazione femminile considerandone la situazione sociale. Affrontare il problema della mortalità delle madri in Guatemala non fa cambiare molto le cose se le ragazze non sono nutrite adeguatamente dalla nascita».

Allo stesso modo, non serve distribuire medicine per la malaria nei dispensari perché le donne non si presentano per ritirarli. Carol Vlassoff, dell'OMS, avanza in un suo lavoro l'ipotesi che alcune malattie tropicali come la schistosomiasi e la malaria possano non essere correttamente individuate o curate nelle donne. Purtroppo, nonostante l'incidenza delle malattie sia la stessa nei due sessi, da alcuni studi risulta sei volte più probabile che siano gli uomini a richiedere medicine o cure. Secondo la Vlassoff, il sistema medico fa ben poco per raggiungere le donne perché spesso esse ricevono scarsa considerazione e non hanno alcun potere economico o politico. In molti paesi africani e dell'Asia medio-orientale, le donne devono ottenere il permesso del marito per frequentare i servizi medici. (Al contrario, le donne americane risultano recarsi dal medico più degli uomini. I ricercatori attribuiscono questo fenomeno alla necessità di cure ginecologiche e ostetriche, al ruolo della donna nella famiglia, dove provvede anche alla salute degli altri membri, e alla diffusa mentalità che ritiene sia più virile non mostrarsi bisognosi di cure mediche.)

Non si può allora pienamente rispondere ai bisogni di salute delle donne se non si tiene anche conto del contesto sociale, compresa la povertà, la struttura della famiglia o la mancanza di potere politico, in cui le donne si trovano a vivere. Innumerevoli studi hanno dimostrato che migliorare le opportunità scolastiche e fornire aiuti finanziari alle donne porta a un miglioramento della loro salute e di quella dei loro figli. Per esempio, è stato individuato un forte legame tra analfabetismo e mortalità infantile. Attraverso una recente ricerca si è scoperto che su 1000 bambini nati da madri alfabetizzate ne morivano 40 contro i 120 nati da altrettante madri analfabete. Secondo stime delle Nazioni Unite, ci sono 597 milioni di donne che non sanno leggere, contro 352 milioni di uomini.

L'idea di una medicina che tenga conto dei diversi contesti culturali costituisce il fulcro di un approccio sanitario che assiste la donna lungo tutto il suo ciclo vitale. «È bene che molti interventi in favore della salute femminile vengano compiuti precocemente» afferma Anne Tinker, che si occupa di problemi sanitari presso la Banca Mondiale. Controllando l'apporto nutrizionale fornito a una bambina, i medici possono garantirle per il futuro una gravidanza e un parto più sicuri. Inoltre, stimolare le giovani donne ad aspettare il compimento degli studi per avere dei figli può aiutarle a ottenere un impiego migliore e quindi maggiori garanzie per la propria salute.

Si tratta di una nuova filosofia che sta maturando, come dimostra lo spostamento del centro di attenzione da parte di organismi internazionali come l'OMS, la Banca Mondiale e la statunitense Agency for International Development. Lo si può anche constatare dalla nascita in tutto il mondo di gruppi che si occupano della salute delle donne. Rappresentanti di tali gruppi hanno fortemente contribuito al documento guida stilato per la Conferenza internazionale delle Nazioni Unite su popolazione e sviluppo che si è tenuta nel settembre di quest'anno al Cairo. Il tema della Conferenza, che si organizza ogni 10 anni, riflette cambiamenti evidenti nel modo di affrontare la pianificazione familiare. Nel 1974 si vedeva la chiave per ridurre la fertilità nella diffusione dei contraccettivi; nel 1994 si ritiene che essa consista nell'assicurare alle donne salute e benessere economico.

Si è però ancora lontani dal traguardo. Molti esperti temono che espandere i servizi di pianificazione familiare fino a comprendere, per esempio, la cura delle malattie a trasmissione sessuale faccia abbassare il livello qualitativo dei programmi assistenziali. Afferma la Wikoff: «C'è molta resistenza a livello teorico: i servizi non vogliono avere l'etichetta di addetti alla cura delle malattie a trasmissione sessuale e sono politicamente spaventati dall'aborto. Vorrebbero aggiornarsi, ma senza cambiare realmente». Ciononostante, gli esperti della salute si rendono conto del fatto che le donne hanno molto poco tempo libero e quindi scarse possibilità di accedere ai centri di cura che, spesso, sono anche molto distanti dalla loro abitazione. Hanno bisogno, perciò, di un'unica struttura a cui rivolgersi.

La Conferenza del Cairo non aveva in agenda i finanziamenti per i progetti pilota, alcuni dei quali, tuttavia, lasciano sperare che l'integrazione dei servizi possa funzionare fornendo prestazioni di alta qualità previa consultazione delle pazienti. La Women's Health Coalition del Bangladesh viene spesso citata come un esempio di integrazione dei servizi che ha funzionato. Le donne vi possono trovare ciò che serve sia per i loro bisogni sanitari di base e per la cura dei problemi ginecologici sia per i loro bambini; esse inoltre possono essere assistite nella contraccezione e nell'aborto. In effetti, si è registrato un aumento nel ricorso alla struttura sanitaria da parte delle donne delle aree rurali pari al 15 per cento.

L'aver preso in considerazione l'intero ciclo vitale femminile ha fatto estendere la rete dei servizi che però continua a urtare contro un ostacolo: la sessualità. I problemi del sesso vanno affrontati in modo più apolitico e più compiutamente medico per poter mettere sotto controllo le malattie a trasmissione sessuale e per garantire aborti sicuri e diminuire il numero di gravidanze in età adolescenziale. Questo modo di affrontare i problemi entra però in conflitto con le convenzioni sociali, la sensibilità politica e le restrizioni religiose presenti in molte culture nel mondo. Il conflitto è divenuto così acuto che risulta impossibile accertare anche i fatti più semplici relativi al comportamento sessuale.

Persino negli Stati Uniti, dove la raccolta di informazioni a carattere demografico è un'attività fiorente, è dai tempi del famoso Rapporto Kinsey degli anni cinquanta che non viene condotta una indagine a livello nazionale sulle pratiche sessuali. Nel 1987, il National Institute of Child Health and Human Development (NICHD) invitò a presentare proposte per una indagine nazionale sulle pratiche e le tendenze sessuali tra gli adulti nell'epoca dell'AIDS e delle malattie a trasmissione sessuale (intendendo, in questo caso, infezioni come quella da *Chlamydia*, la gonorrea, la sifilide e il papillomavirus dell'uomo). Ma, come scoprirono Edward O. Laumann dell'Università di Chicago e diversi suoi colleghi quando proposero un'indagine e la proposta fu accettata, l'invito aveva in realtà un significato trascurabile. Sette anni dopo rimane sempre valida la richiesta di proposte di studi e, abbastanza sorprendentemente, non comprende neppure più la parola «sesso». Come racconta Laumann in un numero recente del periodico «Family Planning Perspectives», vengono usati solo termini come «i più diretti determinanti della fertilità» o «comportamento collegato alla fertilità».

Una madre che allatta e il figlio più grandicello lavorano in una fattoria del Bhutan. Molte donne sono costrette a conciliare la cura dei figli con il lavoro.

Il cancro del seno, che negli Stati Uniti colpisce una donna su nove, viene molte volte diagnosticato mediante la mammografia.

Spesso, per le donne, povertà e vecchiaia vanno di pari passo, come per questa cittadina russa.

Un osso colpito da osteoporosi è meno denso e più fragile di un osso sano. Negli Stati Uniti, oltre 24 milioni di donne soffrono di osteoporosi.

Un'assistenza sanitaria rivolta all'intero ciclo vitale garantirebbe che le bambine di oggi, come questa piccola dello Sri Lanka, godendo di una corretta alimentazione, abbiano una migliore salute anche in età avanzata.

Sono ovvie le conseguenze che un atteggiamento di questo tipo ha sulla salute. L'OMS calcola che ogni anno si verifichino 250 milioni di nuovi casi di malattie a trasmissione sessuale, soprattutto in persone tra i 20 e i 24 anni. Secondo uno studio di Patricia Donovan, dell'Alan Guttmacher Institute di New York, un abitante degli Stati Uniti su quattro è destinato a contrarre una malattia di questo tipo in qualche momento della sua vita, una proporzione che è tra le più alte delle nazioni sviluppate. Dato che molte di tali malattie sono asintomatiche nelle donne, esse spesso non vengono curate finché le malattie non producono effetti indesiderabili come infertilità, infiammazioni pelviche o, addirittura, morte. È noto che il papillomavirus umano può provocare il cancro al collo dell'utero, che uccide più di 200 000 donne ogni anno. Molte malattie a trasmissione sessuale provocano una più rapida diffusione dell'HIV. Purtroppo in molti casi si presta più attenzione alla parte maschile della popolazione che a quella femminile. Inoltre gli uomini subiscono una minor riprovazione sociale se sono affetti da una malattia a trasmissione sessuale.

Sesso e adolescenti

Le altre vittime della scarsità di conoscenze sul comportamento sessuale, e quindi della mancanza di programmi di prevenzione realistici, sono gli adolescenti. Come dice Judith Senderowitz, fondatrice e già direttrice del Center for Population Options, «la gente non ama considerare sessualmente attivi i giovani, e questi ultimi non vogliono pensare alle conseguenze dei loro atti sessuali. Siamo in presenza di una situazione nuova, di un forte scarto biologico-sociale». In conseguenza del migliore tenore di vita, spiega la Senderowitz, ci si sposa più tardi, mentre l'età del menarca è anticipata; c'è quindi un intervallo di circa 10 anni durante i quali i giovani e le giovani non sono sposati e sono sessualmente attivi, ma spesso privi di educazione sessuale e senza possibilità di accedere al controllo delle nascite. Secondo l'OMS, più di metà della popolazione mondiale affetta da HIV ha meno di 25 anni.

I benefici di un atteggiamento aperto nei confronti della sessualità sono evidenti in Svezia, dove, come rileva la Senderowitz, la gente ritiene comunemente che il sesso sia un fatto da vivere con molta libertà. L'educazione sessuale rientra in numerosi programmi scolastici fin dal 1942 e, dal 1956, è diventata obbligatoria. Mentre negli Stati Uniti, nel periodo compreso tra il 1975 e il 1981, la percentuale di aborti tra le ragazze di meno di 20 anni saliva del 43 per cento, in Svezia la percentuale scendeva del 30 per cento. In Svezia l'incidenza di malattie a trasmissione sessuale è una delle più basse al mondo. Al contrario, gli adolescenti statunitensi costituiscono attualmente un quarto dei pazienti affetti da queste malattie. L'educazione sessuale, negli Stati Uniti, varia da Stato a Stato e alcuni programmi non contemplano nemmeno la contraccezione. «Molti degli attuali programmi di educazione sessuale forniscono troppo poca informazione e troppo tardi» afferma Shanti R. Conly, ricercatrice del Population Action International e coautrice con Stephanie L. Koontz di un recente studio sulla salute degli adolescenti. Nel mondo in via di sviluppo, dove l'educazione sessuale è pressoché assente, la situazione è decisamente peggiore. In un caso citato da Conly e Koontz, un quarto dei giovani sotto i 20 anni intervistati nello Sri Lanka erano convinti che una donna potesse rimanere incinta se indossava abiti che erano stati indossati da un uomo. La Conly ritiene che ci si trovi in una vera situazione di crisi e che i Governi nazionali debbano rendersi conto dell'importanza di passare sopra ai tabù morali e sociali.

Quando si osserva il comportamento sessuale delle giovani donne, non si può non considerare quello dei coetanei maschi. Secondo Bruce Armstrong, della Young Men's Clinic presso la School of Public Health della Columbia University, in molte coppie gli uomini hanno grande influenza sul tipo di comportamento da adottare.

La responsabilità maschile

Idee e intuizioni analoghe hanno stimolato una cauta ma sempre maggiore attenzione verso la responsabilità maschile. «Nessuno vuole spostare il fardello sulle spalle degli uomini, perché questo sposta anche il potere» afferma la Winikoff. «Ma è bene mettere sul tavolo la questione.» I primi programmi di pianificazione familiare centravano l'attenzione sulla fertilità femminile e pochi cercavano di includere anche gli uomini. Un esperto di pianificazione familiare cita l'esempio delle donne dello Zimbabwe, che pretendono che gli operatori sanitari nascondano le pillole contraccettive sotto i sassi nei campi in cui esse lavorano perché non vogliono che i loro mariti sappiano della loro volontà di controllare le nascite. Secondo Susheela Singh, direttrice associata della ricerca presso l'Alan Guttmacher Institute, ci si è trovati a fare i conti con la difficoltà di estendere l'uso dei contraccettivi, e si deve prendere atto che le donne non decidono da sole. «Siamo di fronte, in un certo senso, a una trasformazione filosofica nel campo della salute femminile. L'idea è che l'onere della pianificazione familiare non dovrebbe ricadere in così larga misura sulle donne.»

Attualmente, circa il 75 per cento delle sterilizzazioni viene effettuato sulle donne, anche se la legatura delle tube comporta rischi e spese maggiori della vasectomia. La vasectomia, però, è sempre più caldeggiata dai servizi di pianificazione familiare, che cercano così di coinvolgere gli uomini nel processo decisionale. Come afferma Jill Gay della Pan American Health Organization, «gli uomini non hanno un trattamento corretto. Sono esclusi dai servizi sanitari che si occupano di contraccezione. Non si tiene alcun convegno sulla sessualità dei maschi né sulla loro responsabilità». Un tentativo di programma di questo tipo è stato effettuato in Egitto, e nel giro di un anno l'uso dei contraccettivi era raddoppiato. Altri programmi hanno cercato di sensibilizzare gli uomini sull'importanza della nutrizione nel corso della gravidanza. Tentativi fatti in alcuni campi profughi thailandesi hanno prodotto miglioramenti nella salute delle madri e dei neonati.

Gli uomini sono presi in considerazione anche nelle Demographic and Health Surveys, che registrano le variazioni negli indici internazionali di fertilità. Questa raccolta di dati ha messo in luce che, in molte regioni, un uomo può avere più responsabilità di una donna nella nascita di un numero maggiore di figli nel corso della vita. In un recente studio, *Men, Sex, and Parenthood in an Overpopulating World*, il ricercatore del Worldwatch Institute Aaron Sachs riferisce che in Camerun gli uomini generano una media di 8,1 figli - spesso da differenti partner - contro una media di 4,8 figli delle donne.

Anche gli spermatozoi iniziano a vedersi addossare una parte di responsabilità. Non è più solo l'ovulo a dover rispondere della salute o delle eventuali menomazioni del feto, una concezione che in certi casi aveva anteposto il feto alla madre, ledendo il diritto delle donne a scegliersi il lavoro. (Questo argomento arrivò davanti alla Corte Suprema degli Stati Uniti nel caso della Johnson Controls. L'azienda citata in giudizio aveva escluso le donne da un'attività remunerativa adducendo la preoccupazione che l'esposizione al piombo potesse danneggiare un eventuale feto. Nel 1991, la corte emise un verdetto di condanna nei confronti della Johnson Controls.) Via via che aumenta il numero delle ricerche sul ruolo del maschio nella salute del feto, diventa chiaro come anche i gameti maschili siano responsabili di malformazioni genetiche e come siano sensibili, quanto quelli femminili, ai rischi derivanti dal lavoro o dagli stili di vita. Il benzene, il piombo e alcuni pesticidi sono tra i composti che possono danneggiare la vitalità degli spermatozoi, i quali, a loro volta, possono essere responsabili di aborti o problemi nello sviluppo del feto.

Spostando l'attenzione anche sugli uomini, le donne stanno dimostrando che la difesa della salute ha molti aspetti diversi e che nessuno dei due sessi ha l'intera responsabilità. Questa modificazione nelle relazioni tra i sessi si riflette in un'altra trasformazione in atto nel campo della salute femminile: un cambiamento nei rapporti tra diverse culture. Ci si sta rendendo sempre più conto che le iniziative o le scelte politiche dei paesi sviluppati sono destinate al fallimento se imposte ai paesi in via di sviluppo.

La mutilazione dei genitali femminili fornisce un esempio particolarmente significativo. Ogni anno, circa due milioni di ragazze di almeno 26 paesi africani subiscono la clitoridectomia o infibulazione - un'operazione che consiste nella distruzione della clitoride e delle grandi e piccole labbra - spesso senza anestesia. Oltre alla mutilazione, il procedimento può provocare infezione, setticemia e portare alla morte. Le origini culturali di questa pratica sono diverse, ma alcuni temi sono ricorrenti. La mutilazione è vista come un rito di passaggio che assicura il matrimonio. Molte donne la desiderano perché sono state socialmente condizionate a considerare ripugnanti i propri genitali oppure perché la ritengono un obbligo religioso (il che è falso) oppure perché le loro madri e le donne che costituiscono il loro modello di ruolo sociale sono passate attraverso lo stesso rituale.

Anche se Nahid Toubia, una dottoressa sudanese che ha lavorato nel Population Council, afferma che è difficile stabilire un confronto, può essere utile prendere rapidamente in considerazione la tradizione della circoncisione maschile. «Moltissime persone, negli Stati Uniti, non vogliono nemmeno parlarne, perché è una pratica strettamente legata alle loro convinzioni personali. È questo aiuta a capire il comportamento delle popolazioni africane» rileva la Toubia. «Fa parte del loro sistema di credenze, così che non possono nemmeno immaginare di fare altrimenti.» Circa l'85 per cento degli uomini negli Stati Uniti è circonciso, sebbene l'American Academy of Pediatrics non raccomandi né sconsigli la pratica. Un gruppo di medici avanza l'ipotesi che la circoncisione dia benefici sanitari; altri sostengono che lo stesso vantaggio si ha con una buona igiene e che l'asportazione del prepuzio riduce il piacere sessuale.

Le inchieste sulla salute iniziano solo ora a includere domande sulla mutilazione genitale. Come avviene per molti altri settori della salute femminile, ci sono pochi dati rigorosi su cui lavorare. Secondo la Toubia, però, tra gli 85 e i 114 milioni di donne attualmente in vita hanno subito l'operazione. (La Toubia riferisce che la mutilazione dei genitali femminili era praticata in Europa e negli Stati Uniti come rimedio all'isteria, all'omosessualità femminile e alla masturbazione.)

Non solo c'è stata lentezza nel riconoscere quanto la pratica sia diffusa, ma il tentativo di affrontare il problema ha anche rivelato le difficoltà di un'azione rivolta al miglioramento della salute delle donne. Mentre alcune organizzazioni

femminili africane cercano di combattere questa tradizione fin dagli anni sessanta, i politici e i gruppi di donne occidentali solo di recente hanno visto nella mutilazione dei genitali femminili una delle pratiche più orribili che esistano al mondo. Nell'ottobre del 1993, il Congresso degli Stati Uniti ha predisposto un disegno di legge, H.R. 3247, per renderla illegale in quel paese, come già lo è in Francia e nel Regno Unito. Per l'aumento dell'immigrazione, si registrano casi sporadici di clitoridectomia e di infibulazione negli Stati Uniti e in Europa.

Secondo molte donne che si occupano di sanità, e secondo molte cittadine statunitensi di origine africana che lavorano sull'argomento, la punizione e le reazioni imperialistiche sono proprio il modo peggiore per affrontare la questione. «È un esempio orribile ed esasperato di ciò che le donne subiscono in tutto il mondo: il controllo del loro corpo da parte di società a dominanza maschile. Questo controllo è così diretto da sembrare facile da affrontare, ed è per questo che su di esso si è concentrata l'attenzione della gente» afferma Nahid Toubia. Ma «noi stiamo chiedendo un cambiamento di prospettiva».

È proprio da questo tipo di cambiamento di prospettiva che dipende la possibilità di migliorare la salute delle donne. Non basta emanare leggi che garantiscano l'inclusione delle donne nei piani di ricerca clinica o che destinino fondi allo studio e al trattamento degli aspetti di una malattia tropicale legati alla specificità sessuale. Il futuro del benessere femminile sembra piuttosto dipendere dal modo in cui il mondo affronterà le differenze di sesso e di cultura. Senza il coinvolgimento degli uomini e senza una rivoluzione che combatta i pregiudizi nei confronti della sessualità, la società non può aspettarsi di debellare i problemi di fondo che minacciano la salute di ogni uomo e di ogni donna. «Non si tratta di vaccinare la gente» osserva la Toubia. «Si tratta di lottare contro certe concezioni socioculturali.»

BIBLIOGRAFIA

The Health of Women: A Global Perspective, a cura di Marge Koblinsky, Judith Timyan e Jill Gay, Westview Press, 1993.

Population Policies Reconsidered: Health, Empowerment, and Rights, a cura di Gita Sen, Adrienne Germain e Lincoln C. Chen, Harvard School of Public Health, 1994.

Women and Health Research: Ethical and Legal Issues of Including Women in Clinical Studies, a cura di Anna C. Mastroianni, Ruth Faden e Daniel Federman, National Academy Press, 1994.